+ 2701

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

# STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

BME.OMIKK
ÁLLOMÁNYBÓL TÖRÖLVE

1-2

ANUL VI

IANUARIE – IUNIE 1956

EDITURA ACADEMIEI REPUBLICII POPULARE ROMÎNE

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

# STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

1-2

ANUL VI

IANUARIE – IUNIE 1956

EDITURA ACADEMIEI REPUBLICII POPULARE ROMÎNE

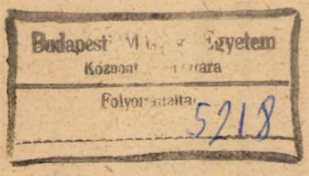
1989

F

2701

*COMITETUL DE REDACȚIE*

ACADEMICIAN I. S. GHEORGHIU—redactor responsabil; ACADEMICIAN C. BUDEANU; M. BERCOVICI, membru corespondent al Academiei R.P.R.; M. MARINESCU, membru corespondent al Academiei R.P.R.; A. AVRAMESCU, membru corespondent al Academiei R.P.R.; C. APETREI, G. BĂRĂNESCU.



ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

# STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

Tomul VI, nr. 1—2 Ianuarie-iunie 1956

## SUMAR

Pag.

*ENERGETICĂ GENERALĂ*

MIRCEA PODANI, Metodologia întocmirii cadastrului hidroenergetic pe teritoriul R.P.R. ..... 7

*TERMOENERGETICĂ*

VICTOR V. GHIA, Contribuţii la evaluarea economiei de combustibil rezultată din aplicarea la cuptoare a arderii cu recirculaţie combinată cu preîncălzirea aerului de ardere ..... 23

*MAŞINI TERMICE*

ADRIAN CĂLIN VASILESCU şi VICTOR PIMSNER, Contribuţie la studiul motoarelor cu ardere internă prin intermediul cifrelor caracteristice . 41

*COMBUSTIBILI SOLIZI*

I. BLUM şi colaboratori, Studiul chimic şi tehnologic al turbelor din R.P.R. Nota I. Studiul caracteristicilor chimico-tehnice şi al gradului de turbificare ..... 67

I. BLUM, M. ROSENBERG şi V. TACU, Valorificarea $SO_2$ din gazele de ardere ale lignitilor în centralele termoelectrice ..... 81

*ELECTROENERGETICĂ*

N. VASILESCU KARPEN, Rolul electronilor în transmisia energiei electrice. Critica actualei teorii ..... 97

C. BUDEANU, Asupra funcţionării supapelor electronice ..... 115

M. MARINESCU şi M. POPOV, Asupra formelor optime ale forţei electromotoare şi inductanţei în maşinile cu inductanţa variabilă ..... 125

V. N. NEDELCU, Determinarea expresiilor curenţilor care apar în înfăşurările statorului generatorului în momentul conectării acestuia la reţea prin metoda autosincronizării ..... 141

*NOTE* ..... 151

*RECENZII* ..... 155

*DIN ACTIVITATEA INSTITUTULUI DE ENERGETICĂ AL ACADEMIEI R.P.R.* ..... 161

EDITURA ACADEMIEI REPUBLICII POPULARE ROMÎNE

ACADÉMIE DE LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE ROUMAINE
INSTITUT D'ÉNERGÉTIQUE

# ÉTUDES ET RECHERCHES D'ÉNERGÉTIQUE

Tome VI, nº 1—2 Janvier-juin 1956

## SOMMAIRE

Page

*ÉNERGÉTIQUE GÉNÉRALE*

MIRCEA PODANI, Méthodes employées pour rédiger le cadastre hydro-énergétique du territoire de la République Populaire Roumaine . . . . 7

*THERMO-ÉNERGÉTIQUE*

VICTOR V. GHIA, Contribution à l'évaluation de l'économie de combustible obtenue par l'application, aux fours, de la combustion à recirculation combinée avec le préchauffage de l'air de combustion . . . . . 23

*MACHINES THERMIQUES*

ADRIAN CĂLIN VASILESCU et VICTOR PIMSNER, Contribution à l'étude des moteurs à combustion interne au moyen des chiffres caractéristiques 41

*COMBUSTIBLES SOLIDES*

I. BLUM et collaborateurs, Étude chimique et technologique des tourbes de la République Populaire Roumaine. Note I. Étude des caractéristiques chimio-techniques et du degré de tourbification . . . . . 67

I. BLUM, M. ROSENBERG et V. TACU, Valorisation du $SO_2$ contenu dans les gaz de combustion des lignites, dans les centrales thermo-électriques 81

*ÉLECTRO-ÉNERGÉTIQUE*

N. VASILESCU KARPEN, Rôle des électrons dans la transmission de l'énergie électrique. Critique de la théorie actuelle . . . . . 97

C. BUDEANU, Sur le fonctionnement des soupapes électroniques . . . . . 115

M. MARINESCU et M. POPOV, Sur les formes optima de la force électromotrice et de l'inductance dans les machines à inductance variable . . 125

V. N. NEDELCU, Expressions des courants qui apparaissent dans les enroulements du stator du générateur synchrone, au moment de sa connexion au réseau, par la méthode de la self-synchronisation . . . . . 141

*NOTES* . . . . . 151

*COMPTES RENDUS* . . . . . 155

*L'ACTIVITÉ DE L'INSTITUT D'ÉNERGÉTIQUE DE L'ACADÉMIE DE LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE ROUMAINE* . . . . . 161

ÉDITIONS DE L'ACADÉMIE DE LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE ROUMAINE

АКАДЕМИЯ РУМЫНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ

# ТРУДЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ЭНЕРГЕТИКЕ

Том VI, № 1—2 Январь—июнь 1956

## СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

*ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА*

М. ПОДАНИ, Методология составления гидроэнергетического кадастра на территории РНР ..... 7

*ТЕРМОЭНЕРГЕТИКА*

В. В. ГИА, К оценке экономии топлива в результате применения в печах циркуляционного горения с воздухоподогревом ..... 23

*ТЕРМИЧЕСКИЕ МАШИНЫ*

А. К. ВАСИЛЕСКУ и В. ПИМСНЕР, К исследованию двигателей внутреннего сгорания при помощи соответствующих характерных цифр ..... 41

*ТВЕРДОЕ ГОРЮЧЕЕ*

И. БЛЮМ и сотрудники, Химико-технологическое исследование торфов РНР. Сообщение I. Исследование техно-химических характеристик и степени торфообразования ..... 67

И. БЛЮМ, М. РОЗЕНБЕРГ и В. ТАКУ, Использование $SO_2$, содержащегося в дымовых газах от сжигания лигнитов в теплоэлектроцентралях ..... 81

*ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА*

Н. ВАСИЛЕСКУ-КАРПЕН, Роль электронов в передаче электроэнергии. Критика существующей теории ..... 97

К. БУДЯНУ, О работе электронных клапанов ..... 115

М. МАРИНЕСКУ и М. ПОПОВ, Об оптимальных формах электродвижущей силы и индуктивности в машинах с переменной индуктивностью ..... 125

В. Н. НЕДЕЛКУ, Выражения токов, возникающих в обмотках статора синхронного генератора в момент включения его в сеть способом самосинхронизации ..... 141

*ЗАМЕТКИ* ..... 151

*РЕЦЕНЗИИ* ..... 155

*В ИНСТИТУТЕ ЭНЕРГЕТИКИ АКАДЕМИИ РНР* ..... 161

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ РУМЫНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 1—2, 1956

*ENERGETICĂ GENERALĂ*

# METODOLOGIA ÎNTOCMIRII CADASTRULUI HIDROENERGETIC PE TERITORIUL R.P.R.

DE

MIRCEA PODANI

## I. PROBLEMELE CADASTRULUI HIDROENERGETIC

Prezentul studiu are ca scop clarificarea anumitor probleme metodologice de calcul a resurselor hidroenergetice teoretice, tehnice şi economice, în condiţiile bazinelor muntoase din R.P.R.

Încă de la începutul planului de electrificare s-a pus problema studierii sistematice a potenţialului hidroenergetic al ţării, în legătură cu dezvoltarea ce urma să o ia construcţiile hidroenergetice. Pentru justa planificare a economiei naţionale este necesar să se cunoască repartiţia acestui important aspect al energiei, inepuizabila energie a cursurilor de apă.

Rămînerea în urmă în domeniul inventarierii potenţialului hidroenergetic este o continuă frînă pentru realizarea planului de utilizare complexă a tuturor resurselor energetice. Stabilirea raportului optim între investiţiile în centralele hidroelectrice, termoelectrice şi atomoelectrice (nucleare) presupune cunoaşterea precisă a posibilităţilor ce le oferă fiecare din aceste surse de energie.

Din acest punct de vedere problema inventarierii potenţialului hidroenergetic, sau pe scurt cadastrul hidroenergetic, prezintă o deosebită importanţă pentru economia planificată socialistă. Trebuie remarcat că cercetătorii sovietici au dat o deosebită atenţie studiului cadastrului hidroenergetic, fapt ce se reflectă în numeroasele publicaţii apărute în ultimul timp în acest domeniu.

Situaţia în domeniul cadastrului hidroenergetic în ţara noastră, situaţie privită în dezvoltarea ei în timp, se prezintă astfel:

În perioada premergătoare planului de electrificare majoritatea lucrărilor făcute în acest domeniu au un accentuat caracter monografic. Dată fiind insuficienţa şi neprecizia datelor care au stat la dispoziţia cercetătorilor, ele au importanţă numai informativă. Apare evidentă de la început neprecizia metodologică şi lipsa de colaborare, fapt explicabil în condiţiile de atunci. Este cunoscut că aceste lucrări sînt deosebit de laborioase, fiind necesară prelucrarea unui mare număr de date iniţiale, fapt ce face practic imposibilă executarea lor de către un singur om.

Au fost întocmite o serie de studii privind amenajarea anumitor bazine fluviale sau sectoare de rîu, rodul iniţiativei şi entuziasmului oamenilor de ştiinţă, care

vedeau în utilizarea energiei apelor un mijloc de ridicare a standardului de viață a populației din regiunile înapoiate. Dintre aceste lucrări pot fi menționate cercetările lui D. Leonida privind Valea Bistriței Moldovene (1923); lucrarea lui N. I. Georgescu și I. S. Gheorghiu referitoare la potențialul hidroenergetic a rîurilor din bazinul Jiului (1925). O bună parte a publicațiilor privind resursele hidroenergetice au apărut în colecția IRE. Astfel sînt lucrările lui Cr. Mateescu asupra Ialomiței și altor bazine hidrografice din Romînia, apoi ale lui D. Pavel asupra Sebeșului și a altor bazine din R.P.R., ale lui P. A. Pastia asupra unor centrale hidroelectrice de pe Siret și Bistrița. Afară de acestea au mai fost întocmite studii și proiecte cu un caracter mai local, cum sînt acele privind amenajarea Dunării. O lucrare mai completă pentru acea etapă, al cărei obiect era cadastrul hidroenergetic, a fost publicată în 1933 de către D. Pavel, sub denumirea de *Planul general de amenajare al forțelor hidraulice din Romînia**). Lucrarea a constituit un pas înainte deoarece a fost o încercare de generalizare a tuturor datelor pe întreaga țară, și tot aici s-au dat și primele scheme de amenajare care permiteau aprecierea resurselor tehnic amenajabile precum și evidențierea sectoarelor mai economice.

În linii mari, acestea au fost materialele de bază care s-au utilizat și în cadrul celei de a III-a conferințe mondiale a energiei (1936).

În preajma întocmirii planului de electrificare situația era prea puțin schimbată față de anii precedenți. De aceea, unul din deziderateie principale ale planului de electrificare întocmit în anul 1950 constă tocmai în necesitatea studierii resurselor hidroenergetice. Astfel, s-au început în paralel, în condițiile create de statul democrat popular, lucrările intense de proiectare și de șantier împreună cu cele de inventariere. Aceste din urmă trebuie să fie cu un pas înainte față de primele, pentru a evita unele erori care ar putea compromite justa concepție despre resursele hidroenergetice. Acest lucru n-a fost realizat pe deplin, adică n-a existat un decalaj între ele.

În perioada primului cincinal 1950—1955 a fost începută opera de inventariere a resurselor, bazată pe materialul nou hidrologic și topometric.

S-au studiat bazinele rîurilor mai importante stabilindu-se prin calcule detaliate potențialul teoretic al principalelor cursuri de apă din aceste bazine, iar pe baza unor scheme preliminare s-au determinat și resursele tehnic amenajabile. La o parte din aceste bazine există și aprecieri tehnico-economice. Majoritatea acestor lucrări au fost întocmite în cadrul I.S.P.E.

Trebuie remarcat faptul, că deși studiile făcute sînt bazate pe un bogat material documentar și pe principiile moderne ale proiectării hidroenergetice, totuși au o serie de deficiențe care pot fi rezumate la următoarele:

— Nu s-a ținut seama decît de potențialul principalelor cursuri de apă, lăsîndu-se neinventariate mulțimea afluenților secundari, care după cum se va vedea au o greutate specifică mare în bilanțul hidroenergetic general.

— Schemele de amenajare sînt întocmite ținînd seama numai de sectoarele mai favorabile.

— Nu se face o delimitare între potențialul tehnic amenajabil și cel economic pe baza unor criterii unice, ținînd seama de întregul ansamblu al utilizării apelor (energetica, ameliorații, transport etc.).

Pentru a remedia aceste neajunsuri ale studiilor făcute pînă acum este necesar să se precizeze metodologia care să permită calculul potențialului teoretic al întregului bazin și care să țină seama de cele mai mici pîraie.

*) În limba franceză.

De asemenea, să se continue studiul bazinelor care n-au fost cuprinse pînă acum, pentru a se putea trece la întocmirea unui *Atlas al resurselor hidroenergetice ale R.P.R.* Pentru stabilirea indicilor tehnico-economici este necesar a se trece la faze de memoriu tehnico-economic în bazinele studiate.

★

Întocmirea cadastrului hidroenergetic constă din următoarele categorii de calcule:

*a)* calculul potențialului teoretic;

*b)* calculul potențialului tehnic, care după unii autori se mai numește și potențial hidroenergetic industrial;

*c)* calculul potențialului economic amenajabil;

*d)* inventarierea resurselor care sînt utilizate la etapa dată.

Fiecare din aceste categorii necesită un studiu cantitativ și calitativ.

În cele de mai jos se dau rezultatele studiului metodologic privind inventarierea resurselor hidroenergetice.

## II. POTENȚIALUL TEORETIC — METODE DE DETERMINARE

Calculul potențialului teoretic trebuie să reflecte resursele real existente pe un teritoriu dat, să fie «fotografia acestora», fără a ține seama de gama limitărilor de natură tehnico-economică sau geologo-topografică. Aici randamentele se iau egale cu 100%. Deși potențialul teoretic este o valoare puțin variabilă în timp (schimbarea ei fiind legată numai de condițiile climaterice și de intervenția omului în natură), totuși aceasta necesită o serie de completări pe baza noilor date obținute din observații și măsurători hidrologice, topografice etc. Al doilea corectiv depinde de metodele utilizate pentru determinarea lui. Însăși metodica cuprinde în sine o serie de aproximații care se perfecționează cu timpul. Trebuie respectat principiul ca exactitatea metodei să corespundă datelor inițiale de care dispunem. Al treilea corectiv apare ca rezultat al intervenției omului în natură, în special datorită marilor construcții hidrotehnice. De aceea chiar acolo unde s-a întocmit în trecut cadastrul hidroenergetic este necesară revizuirea și corectarea lui pe baza noilor date. Astfel se explică de ce în cursul anilor, pe unul și același teritoriu, potențialul hidroenergetic este exprimat de către diferiți cercetători prin cifre care diferă cu mult unele de altele. Acest lucru se observă în majoritatea țărilor. În special aplicarea de metode diferite (nestandard) duce la diferențe mari.

După gradul de concentrare al debitului se disting următoarele două forme ale energiei hidraulice pe un bazin oarecare: energia apei care se scurge pe versanți sub formă de pîrăiașe și energia cursurilor de apă care prezintă interes independent. Suma acestor două energii reprezintă potențialul hidroenergetic al bazinului de recepție luat în întregime. În legătură cu aceasta se pune problema clasificării cursurilor de apă pentru a se putea face o precizare cantitativă a celor două forme ale energiei hidraulice. În cadrul acestui studiu nu este locul a trata problema clasificării cursurilor de apă, aici doar menționăm că în zonele de munte nu s-au studiat pînă acum în general cursurile de apă cu puteri unitare sub $100 \frac{kW}{km}$. Această clasificare necesită un studiu suplimentar.

Din cele de mai sus rezultă, că pentru a avea întregul bilanț hidroenergetic al unui bazin, este suficient să determinăm energia cursurilor de apă cum s-a definit mai sus și energia bazinului luat în întregime. Diferența lor ne dă așa-numita

« energie a versanților » a cărei utilizare este cunoscută în schemele cu canale colectoare pe versanți (Caucaz, Alpii austrieci etc.). La noi remarcăm o formă de utilizare a acestei energii, prin captarea în derivațiile centralelor hidroelectrice a stocului afluenților secundari care se scurg pe versanți.

O parte importantă din potențialul hidroenergetic al țării noastre este dată de numărul mare al afluenților secundari din zonele muntoase. Dat fiind faptul că aceste rîulețe nu permit un studiu individual după metodele liniare cunoscute s-a dat o deosebită atenție metodelor generalizate și celor aproximative, căutîndu-se noi metode aplicabile în condițiile bazinelor muntoase din R.P.R. În acest scop s-au utilizat și ultimele realizări în domeniul inventarierii resurselor hidroenergetice din Uniunea Sovietică, căutîndu-se a fi aplicate la specificul țării noastre.

Dăm mai jos metodele exacte și aproximative care permit calculul generalizat al potențialului hidroenergetic al bazinelor luate în întregime (energia versanților plus energia cursurilor de apă).

## 1. Metode exacte pentru determinarea potențialului teoretic al bazinului luat în întregime

Apa provenită din precipitații se scurge pe suprafața bazinului producînd un efect de eroziune inutil. Presupunem cunoscută funcția continuă $W(H)$, adică variația stocului mediu care se scurge pe suprafața bazinului de recepție. Dacă luăm ca variabilă independentă la început pe $W$ apoi pe $H$, integrînd, obținem

$$E_b = k\int_{H_{\min}}^{H_{\max}} W \cdot dH = k\int_{W_{\min}}^{W_{\max}} H \cdot dW. \tag{1}$$

În calculele practice de obicei stocul se exprimă sub formă de debit specific $\left(\text{modulul stocului în } \frac{l}{\text{s km}^2}\right)$

$$q = \frac{1}{31\,560} \cdot \frac{W}{S}\left(\frac{l}{\text{s km}^2}\right).$$

Cu aceasta energia și puterea vor fi

$$\left.\begin{aligned} E_b &= 86\int_{H_{\min}}^{H_{\max}} q \cdot S \cdot dH \qquad \text{(kWh/an)},\\ N_b &= 9{,}81\cdot 10^{-3}\int_{H_{\min}}^{H_{\max}} q \cdot S \cdot dH \qquad \text{(kW)}, \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

unde

$S$ = suprafața bazinului de recepție în km² și $H$ = altitudinea în m.

Calculul poate fi făcut grafic sau tabelar. În acest caz vom avea elemente de înălțime $H$, iar valorile $q$ și $S$ se vor lua ca medii. Formulele (2) în acest caz

iau aspectul

$$\left.\begin{aligned} E_b &= 86 \cdot \sum_{H_{min}}^{H_{max}} (q \cdot S)_m \cdot H \\ \text{și} \qquad N_b &= 9{,}81 \cdot 10^{-3} \sum_{H_{min}}^{H_{max}} (q \cdot S)_m \cdot H. \end{aligned}\right\} \qquad (2')$$

În figura 1 se arată mersul calculului grafic în cazul integrării pe elemente de înălțime. În afară de curba energiei diferențiale și integrale se indică și curba

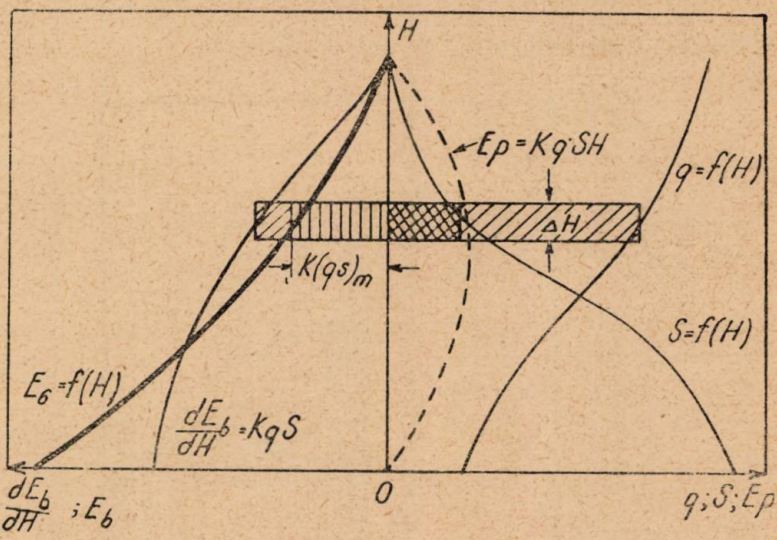



Fig. 1. — Integrarea grafică după elementele de înălțime $\Delta H$ (formula 2).

energiei ce s-ar putea obține prin colectarea stocului în canale de coastă la o anumită cotă și utilizare a lor în punctul cel mai de jos al bazinului (curba $E_p$). Se observă că această curbă are un maximum corespunzător cotei celei mai favorabile pentru construcția unui canal colector.

Dacă integrăm după stoc (sau după suprafața bazinului) obținem grupa de formule pe baza modulului diferențial al stocului care poate avea și valori negative în zonele de pierdere a debitului

$$q' = \frac{1}{31\,560} \cdot \frac{dW}{dS} = \frac{d(q \cdot S)}{dS},$$

adică energia și puterea în acest caz vor fi

$$\left.\begin{aligned} E_b &= 86 \int_{S_{min}}^{S_{max}} q' \cdot H \cdot dS \qquad \text{(kWh/an)}, \\ N_b &= 9{,}81 \cdot 10^{-3} \int_{S_{min}}^{S_{max}} q' \cdot H \cdot dS \qquad \text{(kW)}. \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

În cazul calculului grafic ca şi mai înainte integralele se transformă în sume.

Notînd $H \cdot dS = dV$ obţinem metoda figurii orografice a bazinului preconizată de Mostkov [1] şi [2] sub forma

$$E_b = \frac{1}{367} \cdot \int_0^V m \cdot dV \qquad \text{(kWh)},$$

unde

$m$ = modulul în $\frac{m^3}{\text{an km}^2}$ şi $dV$ = elementul orografic.

Calculul grafic după formula (3) se arată în figura 2.

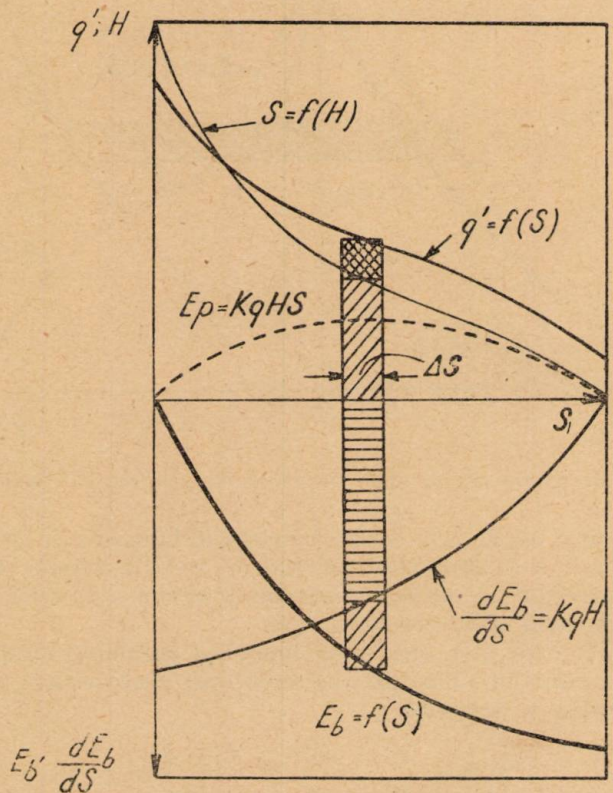



Fig. 2. — Integrarea grafică după elementele de suprafaţă $\Delta S$ (formula 3).

## 2. Metode aproximative

Aplicarea metodelor exacte deduse mai sus nu este totdeauna posibilă din cauza lipsei datelor hidrologo-topografice. De aceea este necesar adesea să exprimăm funcţiile $q(H)$ în mod simplificat. Această simplificare este baza diverselor metode aproximative.

Pentru bazinele mici de munte, cum sînt acelea care ne interesează pe noi, este admisibilă variația liniară a funcției $q(H)$ și $S(H)$ sub forma

$$q = q_{min} + (q_{max} - q_{min}) \cdot \frac{H - H_{min}}{H_{max} - H_{min}},$$

$$S = S_{min} + (S_{max} - S_{min}) \cdot \frac{H - H_{min}}{H_{max} - H_{min}}.$$

Introducînd aceste valori sub integrala (2), după simplificare obținem

$$E_b = 86 (H_{max} - H_{min}) \cdot S_{max} \cdot \left( \frac{q_{max}}{6} + \frac{q_{min}}{3} \right) + S_{min} \left( \frac{q_{max}}{3} + \frac{q_{min}}{6} \right)$$

sau pentru un bazin întreg $S_{min} = 0$; $S_{max} = S_{bazin} = S$ și

$$E_b = 86 \cdot S (H_{max} - H_{min}) \cdot \left( \frac{q_{max}}{6} + \frac{q_{min}}{3} \right). \qquad (4)$$

Cînd rîul se varsă direct în mare obținem formula lui Kalaciov [3]

$$E_b = 86 \cdot S \cdot H_{max} \cdot \left( \frac{q_{max}}{6} + \frac{q_{min}}{3} \right) \quad \text{kWh/an.}$$

Pentru bazinele carpatine, unde se observă variația mare a curbei $q(H)$, este mai just să rezolvăm integrala (2) luînd curba hipsometrică $S(H)$ ca dreaptă, iar modulul stocului sub forma

$$q = q_{min} + a \cdot H^b.$$

După rezolvarea integralei și notînd $c = \frac{2a}{(b+1)(b+2)}$ obținem

$$E_b = 43 \cdot S \cdot H_{max} \cdot (q_{min} + c H^b_{max}) \quad \text{(kWh)}. \qquad (5)$$

În mod analog ca în cazul integrării după cădere se pot rezolva și integralele pe baza modulului diferențial. Astfel se pot obține formulele cunoscute în literatură ca acelea ale lui Grigorovici, Svanidze, Daidbekov și Rustamov [4], [5] și [6]. Aceste formule nu au o aplicabilitate practică la noi, dat fiind faptul că se bazează pe modulul diferențial care nu este utilizat în practica noastră hidrologică.

În formula (5) valorile medii ale parametrilor $b$ și $c$ au fost obținute pe baza tipizării caracteristicilor hidrologo-topografice:

$$b = 1{,}0$$

$$c = 0{,}0025 \div 0{,}0030.$$

Valoarea lor depinde de funcțiile $q(H)$ și $S(H)$. În acest caz formula propusă de autor devine

$$E_b = 43 \cdot S \cdot H_{max} (q_{min} + c H_{max}) \quad \text{(kWh)}. \qquad (5$$

### 3. Metode exacte și aproximative pentru determinarea potențialului teoretic al cursurilor de apă

Deoarece în cazul unui curs de apă variația $W(H)$ are aspectul în trepte datorită aportului afluenților s-a admis în calcule metoda însumării pe sectoare de rîu (norme internaționale). Pentru calculele practice formulele vor fi

$$\left.\begin{aligned} E_b &= 86.10^3 \sum_{H_{\min}}^{H_{\max}} \frac{Q_i + Q_f}{2} \cdot \Delta H \qquad \text{(kWh)}, \\ N_b &= 9{,}81 \sum_{H_{\min}}^{H_{\max}} \frac{Q_i + Q_f}{2} \cdot \Delta H \qquad \text{(kW)}, \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

unde $Q_i$ și $Q_f$ sînt debitele la începutul și la finele sectorului considerat, iar $\Delta H$ căderea pe sector. Debitele de calcul sînt debitul mediu $Q_m$, cu asigurare de 50 și 95% — $Q_{50\%}$ și $Q_{95\%}$. Ca limite de sectoare se iau punctele caracteristice pe rîu: confluențe mai importante, ruperi de pantă, amplasamentele barajelor etc.

Pentru a putea aplica această metodă este necesar să se cunoască profilele în lung pe rîu precum și variația debitelor. La multe rîuri aceste date nu există și de aceea au fost făcute încercări numeroase pentru obținerea de formule aproximative. Dăm mai jos cîteva din formulele caracteristice.

a. *Metoda rîului mediu* propusă de S. V. Grigoriev [7] se bazează pe determinarea coeficientului de putere $\alpha$ care se definește prin relația

$$\alpha = \frac{N}{N_T},$$

unde $N$ este potențialul hidroenergetic căutat, iar $N_T$ este așa-numita putere teoretică ce se obține pe baza debitului la gurile rîului (confluență)

$$N_T = 9{,}81\, Q_v H_T \qquad \text{(kW)}, \tag{7}$$

în care $Q_v$ este debitul la vărsare, iar $H_T$ este căderea totală de la izvoare pînă la vărsare.

Se consideră căderea din punctul în care debitul este suficient pentru a constitui obiectul unui studiu independent prin metode liniare. Determinînd coeficientul de putere mediu pentru raionul studiat, se poate găsi potențialul teoretic al oricărui rîu care curge pe acest teritoriu. Mărimea coeficientului $\alpha$ depinde de tipul profilului longitudinal al rîului $H(L)$ și de curba creșterii suprafeței bazinului cu lungimea rîului $S(L)$.

Exactitatea metodei depinde de grija cu care se face raionarea. Încercarea făcută de autor de a aplica această metodă la condițiile țării noastre arată că abaterile pot merge în unele cazuri pînă la 30%, dată fiind lipsa unei raionări după principiul omogenității fizico-geografice a bazinelor.

b. *Metoda cotei medii* se bazează pe debitul la vărsare $Q_v$, iar cota de calcul este diferența între cota medie a bazinului și cota bazei de eroziune. Deci puterea teoretică a cursului de apă se dă în expresia:

$$N = 9{,}81\, Q_v \cdot H_{\text{calcul}} \qquad \text{(kW)}, \tag{8}$$

$$H_{\text{calcul}} = H_{\text{med}} - H_{b\cdot e}.$$

Formula dă rezultate mulțumitoare numai pentru bazine mici de munte ($S \cong 50$ km$^2$).

c. *Metoda corectată a cotei medii* presupune introducerea unei corecții în formula anterioară care constă din raportul între debitul specific mediu pe bazin și debitul specific la vărsarea rîului, adică puterea teoretică a rîului va fi dată de expresia

$$N = 9{,}81\ Q_v\ H_{\text{calcul}} \frac{q_m}{q_v} \quad \text{(kW)}. \tag{9}$$

Aplicarea formulei devine mai dificilă deoarece nu totdeauna sînt cunoscute elementele $q_m$ și $q_v$.

Debitul mediu se poate deduce prin metode indirecte pe baza precipitațiilor medii și a coeficienților de scurgere. Formula a fost aplicată în condițiile R.S.S. Letone [8] și a dat rezultate bune. În condițiile bazinelor muntoase din R.P.R. formula nu aduce o precizare în plus față de cea anterioară, abaterile mergînd pînă la 50% de unde rezultă că este aplicabilă pentru rîurile de deal și șes.

d. *Metoda bazinelor de bază* este metoda generalizată bazată pe principiul analogiei energetice.

Se definește *modulul energetic* al unui bazin a cărui suprafață este $S_b$, iar puterea și energia, $N_b$ și $E_b$ fiind cunoscute, adică modulul energetic al așa-numitului bazin de bază

$$e_b = \frac{E_b}{S_b} \text{ și } n_b = \frac{N_b}{S};$$

pentru bazinul cercetat formula de calcul va fi

$$E_x = e_b \cdot S_x \cdot \frac{q_x}{q_b};\quad N_x = n_b \cdot S_x \cdot \frac{q_x}{q_b}, \tag{10}$$

în care indicele $x$ se referă la caracteristicile bazinului necunoscut. Se observă că s-a introdus și o corecție după debitul modul [9].

Metoda fiind bazată pe analogie exactitatea ei depinde de felul cum se alege bazinul de bază (sau analog). În condițiile țării noastre o recomandăm numai pentru evaluări preliminare.

★

În legătură cu calculul potențialului teoretic al cursurilor de apă trebuie dată atenție prezentării grafice a materialului. Reprezentările cadastrului hidroenergetic pe un anumit rîu trebuie să cuprindă următoarele funcții, din care o parte sînt discontinue:

— profilul longitudinal al rîului $H(L)$,
— variația debitului cu lungimea $Q(L)$,
— puterea unitară $\frac{dN}{dL} = f(L)$,
— puterea totală $N(L)$;

se mai obișnuiește a se reprezenta și funcțiile ajutătoare:

— panta rîului pe diferite sectoare $\frac{dH}{dL} = f(L)$,

— creşterea suprafeţei cu lungimea $S(L)$,
— delimitarea zonelor (prin verticale cu haşuri între ele) care nu permit amenajări hidroenergetice din motive geologice, sociale etc.

### 4. Bilanţul energetic al unor bazine caracteristice din R. P. R.

Pentru stabilirea raportului mediu între potenţialul teoretic al bazinului luat în întregime şi al cursurilor de apă au fost executate calculele pe un teritoriu cu o suprafaţă de circa 20 000 km². Prin aplicarea formulelor exacte la bazinele care compuneau acest teritoriu s-au obţinut următoarele rezultate trecute în tabloul nr. 1.

*Tabloul nr. 1*

| Bazinul | Puterea teoretică a bazinului pe baza debitului mediu $P_b$ (MW) | Energia teoretică a bazinului $E_b$ (GWh) an | Puterea medie teoretică a cursurilor de apă $P_m$ (MW) | Energia cursurilor de apă $m$ (GWh) an | Raportul $\frac{P_m}{P_b}$ % | Puterea specifică $p = \frac{P_b}{S}$ (kW/km²) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Bazinul A | 345 | 3 020 | 124 | 1 090 | 36 | 92 |
| » B | 700 | 6 000 | 162 | 1 420 | 22 | 140 |
| » C | 442 | 3 870 | 183 | 1 610 | 42 | 67 |
| Bazinul A+B+C (total) | 1 487 | 12 890 | 469 | 4 180 | 32 | 96 |

Din tabloul nr. 1 se observă că raportul dintre potenţialul teoretic al cursurilor de apă (calculat pe baza debitului mediu) şi cel al bazinului luat în întregime este cuprins în limitele 22—42% în mediu pe întreg teritoriul reprezintă 32%, adică energia şi puterea teoretică a cursurilor de apă care se calculează în mod obişnuit prin metoda însumării pe sectoare, reprezintă numai 32% din energia totală a bazinului.

Se observă că acest raport devine mai mic, cu cît creşte cu altitudinea, deci în zonele muntoase nu poate fi neglijată utilizarea afluenţilor secundari, a căror potenţial reprezintă o cifră care depăşeşte pe cea a potenţialului principalelor cursuri de apă. Asupra modului cum poate fi utilizat acest potenţial suplimentar în schemele de amenajare se va vorbi la capitolul următor.

Datele asupra bazinelor studiate mai sus s-au utilizat pentru determinarea erorii pe care o dau diversele metode aproximative, indicate anterior. Din această analiză rezultă că metodele aproximative amintite mai sus dau rezultate suficient de bune (pînă la 20%), iar prin calcularea mediei rezultatelor se obţin valori foarte apropiate de ale metodelor exacte. Calculul potenţialului cursurilor de apă a fost obţinut prin metoda însumării pe sectoare.

Considerînd că aceste bazine sînt caracteristice pentru teritoriul R.P.R. şi introducînd o corecţie de altitudine de circa 8% (prin faptul că bazinele sînt în zona muntoasă-deluroasă), putem obţine o valoare medie a raportului între potenţialul hidroenergetic al cursurilor de apă $P_{c\cdot a}$ şi al bazinului $P_b$. Rezultă un raport $\frac{P_{c\cdot a}}{P_b} = 40\%$ care este o valoare ponderată.

Ţinînd seama de faptul că potenţialul teoretic al principalelor cursuri de apă, obţinut prin metoda însumării pe sectoare, reprezintă circa 8 000 MW, şi admiţînd raportul de mai sus ca valabil pentru întreaga ţară, se poate deduce cu o precizie suficientă pentru acest fel de calcule, valoarea potenţialului teoretic al bazinelor. Această valoare va fi pentru R.P.R.

$$P_b = \frac{8\,000}{0{,}40} = 20\,000 \text{ MW},$$

iar pentru energia teoretică a bazinelor se obţine

$$E_b = 175\,000 \text{ GWh}.$$

Aceste date indică prezenţa unui potenţial deosebit de important (12 000 MW) care n-a fost pînă în prezent studiat.

Metodologia de calcul arătată a fost aplicată de autor în cadrul lucrărilor de inventariere a potenţialului hidroenergetic al R.P.R., executate în I.S.P.E fapt ce a permis studiul bilanţului energetic al unor bazine.

## III. INDICII DE UTILIZARE TEHNICĂ A POTENŢIALULUI HIDROENERGETIC

În capitolele anterioare s-a făcut clasificarea hidroenergiei după criteriul repartiţiei teritoriale şi după gradul de concentrare. S-a definit energia bazinului versanţilor şi a cursurilor de apă. Datorită însă existenţei diferitelor pierderi inevitabile, nu este posibilă utilizarea completă a potenţialului teoretic.

Apare noţiunea de utilizare tehnică sau *industrială* a resurselor hidroenergetice, adică acea parte care poate fi obţinută în instalaţiile hidroenergetice, la etapa dată a dezvoltării hidrotehnicii.

Spre deosebire de potenţialul teoretic, gradul de utilizare tehnică variază în timp datorită perfecţionării schemelor de amenajare şi a creşterii posibilităţilor tehnice.

Deosebit de mari salturi în gradul de utilizare a resurselor se constată la trecerea de la o politică economică la alta.

Un exemplu viu în acest sens îl prezintă ţările de democraţie populară în care construcţiile hidrotehnice au luat amploare.

Pentru stabilirea gradului de utilizare tehnică a unui bazin hidrografic oarecare, este necesar a se întocmi schema de amenajare hidroelectrică (S.A.H.).

Condiţiile care trebuie să le îndeplinească schemele de amenajare hidroelectrică constituie un capitol important al hidroenergeticii. Ne limităm la enunţarea principiilor de bază care trebuie respectate la întocmirea acestor scheme, cu menţiunea că aici, mai mult ca în oricare alt domeniu hidroenergetic, este necesar studiul amănunţit al complexului de condiţii locale care imprimă un caracter individual, de la bazin la bazin.

Datorită acestui complex de condiţii la alegerea schemei de amenajare se aplică metoda eliminării variantelor. Pentru aceasta se ţine seama de factori cum sînt particularităţile hidrologice, topografice şi geologice ale zonei respective, de prezenţa localităţilor, de condiţiile puse de sistemul energetic şi de alţi factori tehnico-economici. Pentru a elimina subiectivismul la proiectarea preliminară a schemelor de amenajare trebuie avute în vedere următoarele considerente:

— Utilizarea maximă a căderilor pe baza schemelor în cascadă.

— Concentrarea debitelor şi căderilor în trepte cît mai mari.

— Crearea de volume de compensare a debitelor cît mai mari acolo unde este posibil în mod economic.

— Concentrarea debitelor în lacurile acumulatoare dispuse la cota înaltă, cu ajutorul canalelor colectoare de coastă, fapt ce va da posibilitatea utilizării în toate treptele cascadei a debitului suplimentar obținut. Aceasta este forma de utilizare tehnică a « energiei versanților ».

— Alegerea tipului de uzină și a factorului de supraechipare în raport cu necesitățile de putere în sistemul energetic.

— Prevederea cerințelor de gospodărire a apei pentru a găsi soluția optimă de amenajare.

— Întocmirea unui studiu energetic al cascadei din care să rezulte divizarea în trepte după caracteristicile hidrologice, topografice și geologice. Acest studiu dă posibilitatea aflării profilelor optime de amplasare ale lacurilor de compensare.

— În unele cazuri devierea debitelor dintr-un bazin în altul poate avea un efect energetic însemnat, dat fiind cîștigul de căderi utilizabile.

Deducerea potențialului tehnic amenajabil pentru un teritoriu mai mare pe care n-au fost studiate schemele de amenajare, se poate face cu ajutorul *indicilor de utilizare tehnică* a resurselor, deduși prin similitudine cu alte bazine deja studiate. Acești indici permit de asemenea și aprecierea pe de o parte a calității energetice a bazinelor și pe de altă parte calitatea schemei întocmite.

În cele ce urmează se vor defini acești indici și se vor da valorile numerice pentru o serie de bazine caracteristice.

În energia tehnică a bazinului de recepție se cuprinde nu numai energia cursurilor de apă, ci și cea obținută cu ajutorul calculelor de colectare a stocului de pe versanți. Însumînd, obținem puterea (sau energia) tehnică a bazinului

$$E_{b\cdot teh} = E_{case.} + E_{v\cdot teh} \tag{11}$$

Mai intervine un element variabil — numărul de ore de utilizare a puterii, deci

$$E_{b\cdot teh} = N_{case.} \cdot t_{case.} + N_{v\cdot teh} \cdot t_v . \tag{12}$$

Introducînd coeficienții de utilizare tehnică putem face trecerea de la potențialul teoretic la cel tehnic. Pentru cascada centralelor hidroelectrice avem

$$\begin{aligned} E_{case.} &= E_{teh} \cdot \eta^E_{case.} \\ N_{case.} &= N_{teh}\ \eta^N_{case.} \end{aligned} \tag{13}$$

Relații analoge pot fi obținute și pentru energia și puterea dedusă prin utilizarea stocului versanților. În acest caz indicii se vor nota $\eta^E_v$, $\eta^N_v$ și pentru bazin $\eta^E_b$, $\eta^N_b$.

Coeficienții de utilizare tehnică globali pot fi defalcați în următoarele componente, după cele trei elemente care intervin în calcul: debitul $Q$, căderea $H$ și aparatajul $A$.

Aceste componente sînt:

$\eta^Q$ — componenta hidrologică;

$\eta^H$ — componenta topografică;

$\eta^A$ — componenta după randamentul aparatajului și instalațiilor.

La rîndul lor aceste componente, cum a arătat prof. T. L. Zolotarev în cercetările sale [10], constau din trei corecții:

$\eta_{pr}$ — corecția de proiectare;

$\eta_c$ — corecția la centrală;

$\eta_s$ — corecția de sistem;

cu acestea obținem componentele

$$\gamma_i^Q = \gamma_{i\,pr}^Q \cdot \gamma_{i\,c}^Q \cdot \gamma_{i\,s}^Q,$$
$$\gamma_i^H = \gamma_{i\,pr}^H \cdot \gamma_{i\,c}^H \cdot \gamma_{i\,s}^H,$$
$$\gamma_i^A = \gamma_{i\,pr}^A \cdot \gamma_{i\,c}^A \cdot \gamma_{i\,s}^A.$$

În acest mod rezultă coeficienții de utilizare tehnică a cascadei centralelor hidroelectrice pe cursul de apă respectiv

$$\gamma_{i\,casc.}^E = \gamma_{i\,E\cdot casc.}^Q \cdot \gamma_{i\,E\cdot case-}^H \cdot \gamma_{i\,E\cdot casc.}^A$$

și după putere

$$\gamma_{i\,casc.}^N = \gamma_{i\,N\cdot casc.}^Q \cdot \gamma_{i\,N\cdot casc.}^H \cdot \gamma_{i\,N\cdot casc.}^A$$

Expresii analoge se pot deduce pentru componentele privind stocul colectat de pe versanți și pentru bazinul de recepție luat în întregime.

Pentru determinarea valorii componentelor definite mai sus este necesar să se cunoască, în mod amănunțit, caracteristicile fiecărui element care intră în componenta schemei de amenajare.

Pe baza schemelor deja întocmite în care are loc utilizarea stocului în cascadă de hidrocentrale, precum și a stocului versanților, se pot da valorile medii ale acestor coeficienți.

Astfel pentru bazinele caucaziene pot fi indicate valorile din tabloul nr. 2 [4].

*Tabloul nr. 2*

| | Caucaz (proiect) | |
|---|---|---|
| Coeficienții de utilizare tehnică . . | $\gamma_i^E$ | $\gamma_i^N$ |
| Cascada (cursuri de apă) . . . . . | 0,48 | 0,76 |
| Versanții . . . . . | 0,49 | 0,77 |
| Bazinul total . . . . . | 0,49 | 0,77 |

Cifre asemănătoare se obțin și pentru masivul muntos Tauern din Alpii austrieci (amenajări existente).

Aceste valori mari ale coeficienților de utilizare tehnică se explică pe de o parte prin captarea stocului versanților în mari lacuri de acumulare (peste 1 000 km de canale) pe de altă parte datorită condițiilor favorabile hidrologo-topografice (alimentarea din ghețari).

Pentru a obține indicii de utilizare tehnică a potențialului hidroenergetic în zonele muntoase din R.P.R. au fost întocmite și analizate schemele de amenajare a bazinelor indicate mai înainte. S-au obținut următoarele valori (tabloul nr. 3).

*Tabloul nr. 3*

| Bazinul | Puterea teoretică a cursurilor de apă $P_m$ (MW) | Puterea tehnic amenajabilă | | | Energia teoretică a cursurilor de apă $E_m$ GWh | Energia medie productibilă în UHE | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Puterea inst. (tehn.) $P_i$ (MW) | Puterea UHE la debit mediu $P_m$ teh | Raportul $\frac{P_m\,teh}{P_m}\,100\%$ | | $E_{teh}$ (mil kWh) | $\frac{E_{teh}}{E_m}\,100\%$ |
| Bazinul A | 43,73 | 92,84 | 31,70 | 72 | 383 | 262 | 68 |
| » B | 42,90 | 84,64 | 39,60 | 92 | 376 | 300 | 80 |
| » C | 37,86 | 35,04 | 20,15 | 53 | 331 | 154 | 46 |
| Bazin A+B+C . | 124,49 | 212,52 | 91,45 | 73% | 1 090 | 716 | 66% |

Din tabloul nr. 3 se observă că potențialul tehnic amenajabil al cursurilor de apă reprezintă circa 73% din cel teoretic, după putere, iar după energie circa 66%.

Ținînd seama de faptul că aceste cifre sînt caracteristice pentru majoritatea bazinelor muntoase, le putem admite, cu oarecare aproximație, ca valori medii pentru întreaga țară. De aici rezultă că din potențialul tehnic al principalelor cursuri de apă care a fost evaluat la 8 000 MW vor putea fi utilizate în centralele hidroelectrice la debitul mediu circa 8 000.0,70 = 5 600 MW. S-a admis în mod acoperitor raportul 0,70.

De date asupra schemelor de utilizare tehnică a stocului versanților în R.P.R. nu dispunem, deși sînt cunoscute unele scheme de utilizare parțială a acestuia (de exemplu pe r. Bîrzava).

Menționăm că prezența marilor lacuri de acumulare care se prevăd a intra în exploatare în viitorul apropiat, deschid posibilități mari pentru utilizarea stocului versanților.

## IV. POTENȚIALUL HIDROENERGETIC ECONOMIC AMENAJABIL

După stabilirea potențialului tehnic amenajabil, etapa următoare de calcul în cadrul lucrărilor de cadastru hidroenergetic, o constituie stabilirea potențialului economic amenajabil. Trebuie să subliniem că această problemă nu și-a găsit rezolvarea definitivă și nu constituie obiectul studiului metodologic de față. Menționăm că determinarea potențialului economic amenajabil nu poate fi realizată pornind numai de la indicii economici ai anumitor centrale hidroelectrice luate independent.

Pentru aceasta trebuie ținut seama de întreg complexul factorilor tehnico-economici și de cei sociali, știut fiind că amenajările hidroelectrice au o deosebită importanță pentru progresul raioanelor aferente lor.

Unul dintre criteriile obiective este acela care permite aprecierea economică pe baza studiului de perspectivă a sistemului electroenergetic în care vor funcționa centralele hidroelectrice analizate (componenta surselor și a consumatorilor).

Apariția unei noi surse de energie, energia nucleară, impune condiții noi pentru determinarea investițiilor ce trebuie făcute la o anumită etapă în construcția centralelor hidroelectrice.

De asemenea utilizarea complexă a stocului regularizat în marile lacuri de acumulare influențează etapizarea construirii de noi centrale hidroelectrice, știut fiind că acestea din urmă vor trebui să preia vîrfurile de sarcină.

Pe baza evaluărilor preliminare a prețului de cost al puterii și energiei, în prezent, se consideră ca economic amenajabile circa 55% din potențialul teoretic al principalelor cursuri de apă interioare.

## V. CONCLUZII

Din studiul de mai sus privind metodologia întocmirii cadastrului hidroenergetic pe teritoriul R.P.R., pot fi trase următoarele concluzii:

1) Gradul de studiere a resurselor potențiale hidroenergetice nu corespunde cerințelor actuale și nu oglindește situația reală:

2) Pe baza metodologiei indicate este necesar a se trece la aprecierea potențialului teoretic nu numai a principalelor cursuri de apă ci și a celor mai mici afluenți, utilizînd metodele generalizate de calcul.

3) În cazul că nu dispunem de suficiente date privind caracteristicile hidrologice şi topografice, se recomandă formulele aproximative indicate în studiu. Alegerea uneia sau alteia din aceste formule depinde de caracteristicile hidrologo-topografice locale.

4) Potenţialul cursurilor de apă reprezintă circa 40% din potenţialul teoretic al bazinului (în medie pentru R.P.R.).

5) Puterea tehnică amenajabilă a cursurilor de apă este circa 70% din puterea calculată la debitul mediu.

6) Este necesar să se dea atenţie schemelor de utilizare a stocului colectat de pe versanţi, care poate produce un efect energetic important, mai ales în prezenţa marilor lacuri de acumulare.

7) Potenţialul economic amenajabil al R.P.R. nu este suficient de studiat pe baza unei metodologii ştiinţifice. Se impune aprofundarea acestui studiu în viitorul apropiat.

8) Pentru sistematizarea şi generalizarea materialului existent şi al celui care se va mai obţine în cursul primei etape al celui de al II-lea cincinal privitor la resursele hidraulice este utilă întocmirea unui *Atlas al resurselor hidroenergetice din R.P.R.*, care să servească în scopuri energetice şi de folosire complexă a apelor.

## МЕТОДОЛОГИЯ СОСТАВЛЕНИЯ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КАДАСТРА НА ТЕРРИТОРИИ РНР

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

В исследовании описываются различные методы определения теоретического, технического и экономического гидроэнергетического потенциала в условиях горных бассейнов РНР.

Автор приходит к заключению, что степень изученности потенциальных гидроэнергетических ресурсов не отражает действительного положения вещей, поскольку должны быть исследованы и небольшие реки — притоки главных водных путей на основе упрощенных методов, изложенных в работе.

Необходимо более углубленное изучение поддающегося освоению экономического потенциала РНР и составление атласа гидроэнергетических ресурсов.

### ОБЪЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1. — Графическое интегрирование по элементам высоты $\Delta H$ (формула 2).
Рис. 2. — Графическое интегрирование по элементам поверхности $\Delta S$ (формула 3).

## MÉTHODES EMPLOYÉES POUR RÉDIGER LE CADASTRE HYDRO-ÉNERGÉTIQUE DU TERRITOIRE DE LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE ROUMAINE

(RÉSUMÉ)

L'étude traite des diverses méthodes utilisées pour déterminer le potentiel hydro-énergétique théorique, technique et économique, dans les conditions des bassins montagneux du territoire roumain.

On constate que le stade des études actuelles des ressources potentielles hydro-énergétiques ne reflète pas la situation réelle, étant donné qu'il faudrait également étudier les petites rivières, affluents des cours d'eau principaux.

La nécessité s'impose d'approfondir l'étude du potentiel économique aménageable de la République Populaire Roumaine, par la rédaction d'un atlas des ressources hydro-énergétiques.

## EXPLICATION DES FIGURES

Fig. 1. — Intégration graphique en raison des éléments de hauteur $\Delta H$ (formule 2).
Fig. 2. — Intégration graphique en raison des éléments de surface $\Delta S$ (formule 3).

## BIBLIOGRAFIE


1. M. A. Mostkov, *Metod issledovania raspredeleniia gidravliceskoi energhii*, în *Trudi energheticeskogo instituta AN SSSR*. Moscova, 1950, vol. V.
2. — *Ob iscislenii zapasov ghidravliceskoi energhii*. Izv. AN SSSR, Moscova, 1950, nr. 6.
3. N. S. Kalaciov, *Metodika uciota potențialnîh vodnoenergheticeskih resursov recinîh basseinov*. Alma-Ata, 1950.
4. G. G. Svanidze, *Elementî teorii kaskadnogo ispolzovaniia vodotokov*, Dissertația. Tbilisi, 1950.
5. N. A. Grigorovici, *Ghidroenergheticeskii kadastr*. Moscova, 1937.
6. S. G. Daidbekov i S. G. Rustamov, *Metodologhia opredelenia vodnosilovogo kadastra*, în *Trudi energheticeskogo instituta im. I. G. Essman*. Bacu, 1947, vol. VIII.
7. S. V. Grigoriev, *Potențialnîie energoresursî malîh rek SSSR*. Ghidrometeoizdat, Leningrad, 1946.
8. M. L. Lasinskas. *Pokazateli ghidroenergoresursov malîh rek Litowskoi SSSR*, Dissertația. Kaunas-Minsk, 1953.
9. S. V. Klopov, *Izucenie i ispolzovanie ghidroenergheticeskih resursov gornîh raionov*. Izd. AN SSSR, Moscova, 1950.
10. T. L. Zolotarev, *Ghidroenerghetica*. Gosenergoizdat, Moscova-Leningrad, 1950.
11. T. L. Zolotarev i N. A. Karaulov, *O sostoianii uceta i izuceniia ghidroenergheticeskih resursov SSSR. Atlas energeticeskih resursov SSSR*. Izd. AN SSSR, Moscova, 1938, vol. II.
12. M. L. Lvovici, *Opît klassifikații rek SSSR* în *Trudî GGI*. Moscova-Leningrad, 1938, vol. 6.
13. N. A. Karaulov, *K voprosu ob iscislenii vodnoi energhii vîsokogornîh raionov*. Izv. NIIG, 1932, vol 5.
14. I. I. Urban i D. S. Șevelev, *O metodologhii iscisleniia potențialnîh zapasov ghidroenerghii*, în *Trudî Leningradskogo industrialnogo instituta*. 1936, nr. 11, seria I, secția hidrotehnică.
15. D. Pavel, *Forțele hidraulice disponibile ale Romîniei*. IRE, București, 1929, nr. 23.
16. — *Plan général d'aménagement des forces hydrauliques en Roumanie*. IRE, București, 1933, nr. 58.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 1—2, 1956

*TERMOENERGETICĂ*

# CONTRIBUŢII LA EVALUAREA ECONOMIEI DE COMBUSTIBIL REZULTATĂ DIN APLICAREA LA CUPTOARE A ARDERII CU RECIRCULAŢIE COMBINATĂ CU PREÎNCĂLZIREA AERULUI DE ARDERE

DE

VICTOR V. GHIA

În această lucrare se propune o metodă grafică-analitică de calcul a economiei de combustibil obţinută prin aplicarea arderii cu recirculaţie combinată cu preîncălzirea aerului de ardere la cuptoare. Faţă de metodele clasice, această metodă prezintă o serie de avantaje:

— uşurează considerabil rezolvarea problemei propuse, deoarece înlătură utilizarea unor formule deosebit de complicate;

— măreşte precizia evaluării diverselor schimburi energetice, deoarece ţine seama în mod riguros de variaţia căldurilor specifice cu temperatura;

— dă o generalizare uşoară a fenomenelor termice sub forma unor nomograme.

Evaluarea economiei de combustibil rezultată se va face, printr-o comparaţie cu arderea normală*) şi arderea cu recirculaţie fără preîncălzirea aerului de ardere.

Drept criterii de comparaţie s-au ales:

— temperatura gazelor de evacuare din cuptor şi temperatura din focar;

— condiţiile în care are loc arderea şi pierderile de căldură în mediul ambiant;

— calitatea combustibilului şi cantitatea de căldură transmisă pe oră produsului tehnologic sînt aceleaşi în cele trei variante de ardere amintite anterior.

## 1. DETERMINAREA PROPORŢIEI DE GAZE RECIRCULATE

În cele ce urmează se vor folosi notaţiile:

$Q_d$ = căldură disponibilă în focar prin arderea combustibilului, $\left(\frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3}\right)$**);

*) Prin ardere normală se înţelege acea combustie la care cantitatea de aer pentru ardere este mai mare decît cantitatea necesară asigurării unei arderi complete a combustibilului. Aerul introdus suplimentar serveşte la răcirea gazelor de ardere din focar pînă la temperatura cerută de procesul tehnologic.

**) Toţi parametrii raportaţi la 1 $Nm^3$ ce vor apărea în continuare se referă la 1 $Nm^3$ combustibil gazos. Dacă se arde combustibil lichid sau solid, aceiaşi parametrii se vor referi la 1 kg combustibil.

$H_i$ =puterea calorifică inferioară a combustibilului utilizat, $\left(\frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3}\right)$;

$\alpha_0$ = coeficientul excesului de aer minim la care arderea are loc în condiții optime;

$\Delta\alpha$ = creșterea coeficientului de exces de aer, datorită aerului fals aspirat;

$k$ = coeficientul care indică proporția din puterea calorifică inferioară a combustibilului, ce se pierde din focar în mediul ambiant;

$\eta_f$ = randamentul arderii în focar;

$\rho$ = proporția de gaze recirculate;

$t_a$ = temperatura mediului ambiant, (°C);

$t_p$ = temperatura de preîncălzire a aerului de ardere, (°C);

$t_e$ = temperatura produselor de ardere la evacuarea din cuptor, (°C);

$t_f$ = temperatura din focar necesară procesului tehnologic, (°C) *);

$t_{fp}$= temperatura ce se atinge în focar în cazul arderii normale, atunci cînd lucrează cu coeficientul de exces de aer $\alpha_0$ și se preîncălzește aerul de ardere la temperatura $t_p$, (°C);

$V_0$ = cantitatea teoretică de aer pentru ardere, $\left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3}\right)$;

$V_g$ = cantitatea de gaze rezultate din arderea unității de cantitate de combustibil la coeficientul de exces de aer $\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha$, $\left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3}\right)$;

$V_{g_0}$ = cantitatea de gaze rezultate din arderea unității de cantitate de combustibil la coeficientul de exces de aer $\alpha_0$, $\left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3}\right)$;

$I_{ata}$ = entalpia cantității teoretice de aer pentru ardere $V_0$ la temperatura $t_a$ (kcal);

$I_{ap}$ = entalpia cantității teoretice de aer pentru ardere $V_0$ la temperatura $t_p$, (kcal);

$I_e$ = entalpia cantității de gaze de ardere $V_g$ la temperatura $t_e$, (kcal);

$I_f$ = entalpia cantității de gaze de ardere $V_g$ la temperatura $t_f$, (kcal);

$I_f^r$ = entalpia cantității de gaze de ardere $V_{g_0}$ la temperatura $t_f$, (kcal);

$I_{fp}^r$= entalpia cantității de gaze de ardere $V_{g_0}$ la temperatura $t_{fp}$, (kcal).

Studiul arderii cu recirculație combinată cu preîncălzirea aerului de ardere se va face în ipoteza că arderea combustibilului are loc în condiții optime pentru un anumit coeficient de exces de aer $\alpha_0$.

Preîncălzirea aerului de ardere, $\alpha_0 V_0$, între temperaturile $t_a$ și $t_p$ se absoarbe cantitatea de căldură

$$\Delta I_p = (I_{ap} - I_{ata})\,\alpha_0,$$

care este reprezentată în figura 1 prin segmentul *ab*.

*) Pentru ușurința expunerii și în cele ce vor urma se va considera că $t_f$ și $t_{fp}$ sînt temperaturile gazelor rezultate din arderea combustibilului, înainte ca acesta să cedeze căldură produsului tehnologic, deci focarul este dispus înaintea spațiului de lucru. Această ipoteză nu modifică valoarea economiei de combustibil ce se va calcula, chiar dacă se arde combustibilul în spațiul de lucru.

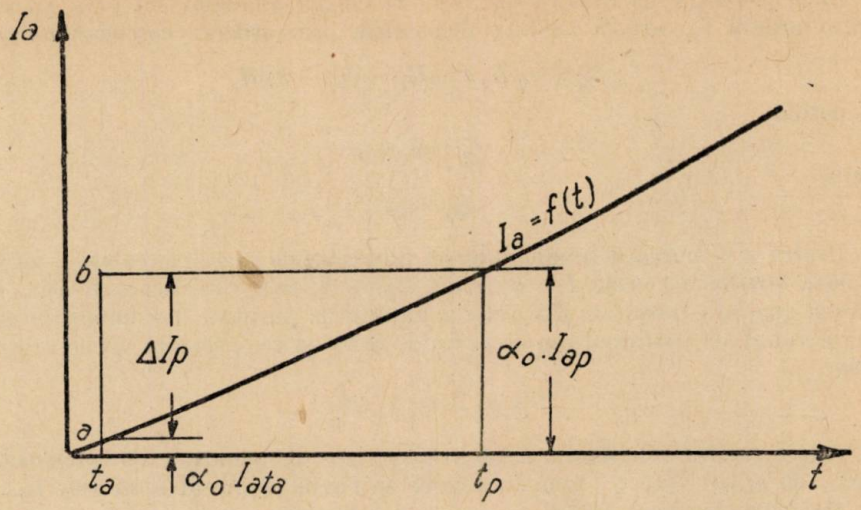



Fig. 1. — Evaluarea cantității de căldură $\Delta I_p$.

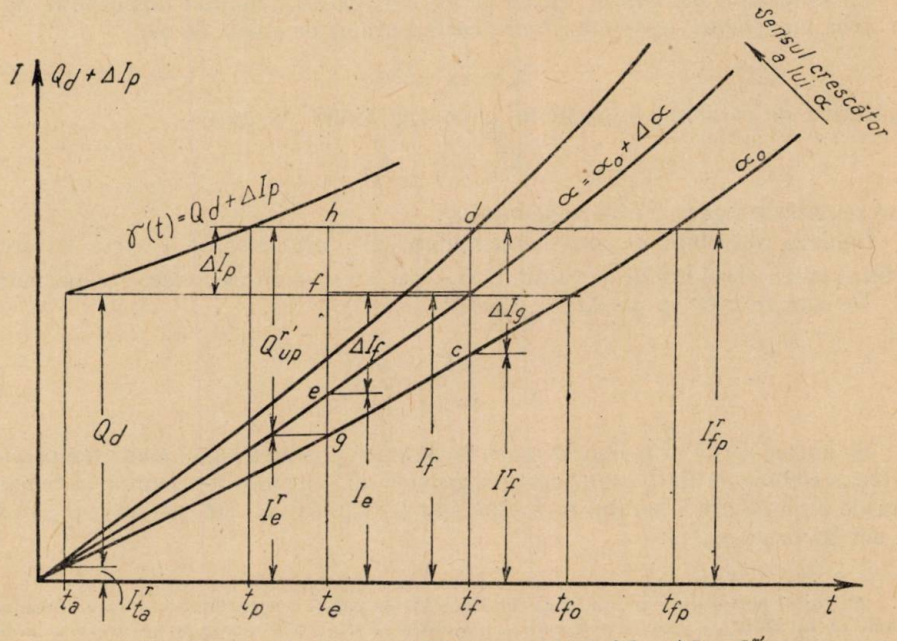



Fig. 2. — Evaluarea cantităților de căldură $\Delta I_g$, $\Delta I_f$, $Q'_{up}$.

Dacă pierderile de căldură din focar în mediul ambiant sînt $kH_i$, iar randamentul arderii $\eta_f$, atunci căldura disponibilă prin arderea combustibilului este

$$Q_d = \eta_f H_i - kH_i = (\eta_f - k) H_i$$

sau notînd

$$\eta_f - k = q$$

rezultă

$$Q_d = qH_i \tag{1}$$

Pentru a se putea determina comod proporția de gaze recirculate $\rho$ va trebui ca peste familia de curbe $I = \varphi(t)$ din figura 2, care precizează relația dintre entalpia gazelor — rezultate din arderea unității de cantitate de combustibil pentru diverse valori ale coeficientului de exces de aer — și temperatură, să se suprapună curba

$$\gamma(t) = Q_d + \Delta I_p .$$

Astfel rezultă din figura 2 că atunci cînd temperatura de preîncălzire a aerului de ardere este $t_p$, temperatura ce se poate obține în focar este $t_{fp}$.

Dacă temperatura cerută de procesul tehnologic în focar este $t_f$, pentru a se putea realiza, va trebui absorbită cantitatea de căldură

$$\Delta I_g = I^r_{fp} - I^r_f ,$$

care este reprezentată în figura 2 prin segmentul *cd*.

Această cantitate de căldură poate fi absorbită de gazele recirculate

$$\rho \cdot V_g = \rho (V_{g0} + \Delta\alpha \cdot V_0).$$

La evacuarea din cuptor, gazele de ardere, datorită aerului fals aspirat $\Delta\alpha\, V_0$ vor avea compoziția corespunzătoare coeficientului de exces de aer

$$\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha.$$

Cantitatea de căldură absorbită de gazele de ardere $V_g$ este,

$$\Delta I_f = I_f - I_e ,$$

reprezentată în figura 2 prin segmentul *ef*.

Căldura absorbită de gazele recirculate $\rho V_g$ este $\rho \Delta I_f$ și aceasta va trebui să fie egală cu disponibilul de căldură $\Delta I_g$, pentru a se putea realiza temperatura $t_f$

De aici rezultă că $\rho \cdot \Delta I_f = \Delta I_g$

sau

$$\rho = \frac{\Delta I_g}{\Delta I_f} = \frac{cd}{ef} . \tag{2}$$

Se obține astfel proporția de gaze recirculate $\rho$ pentru cazul cînd: temperatura în focar trebuie să fie $t_f$, temperatura gazelor de evacuare din cuptor și temperatura de preîncălzire a aerului de ardere sînt $t_e$ respectiv $t_p$, iar coeficientul de exces de aer în focar $\alpha_0$ *).

*) Nu se ține seama de oxigenul ce se găsește în gazele recirculate, care sînt considerate numai ca un fluid ce absoarbe și cedează căldură. Totuși acest oxigen va favoriza arderea combustibilului în bune condiții.

## 2. DETERMINAREA RANDAMENTULUI TERMIC $\eta_{ip}^{r}$

Se vor folosi următoarele notații importante, care apar în plus față de capitolul precedent:

$t_{p_1}$, $t_{p_2}$ = temperaturile de preîncălzire ale aerului de ardere pentru care se realizează în focar în cazul arderii normale, temperaturile $t_{fp_1}$, respectiv $t_{fp_2}$, (°C);

$Q_u'$ = diferența dintre entalpiile gazelor rezultate din arderea unității de cantitate de combustibil la un coeficient de exces de aer oarecare, luate la temperatura din focar și temperatura de evacuare din cuptor; (kcal);

$Q_{up}^{r'} = I_{fp}^{r} - I_e^{r}$ = diferența dintre entalpiile gazelor rezultate din arderea unității de cantitate de combustibil la coeficientul de exces de aer optim $\alpha_0$, luate la temperatura din focar obținută prin preîncălzirea aerului de ardere și temperatura de evacuare din cuptor, (kcal);

$Q_{up}^{r}$ = căldura utilă ce se obține în cazul arderii cu recirculație combinată cu preîncălzirea aerului de ardere, (kcal);

$Q_p$ = căldura pierdută din spațiul de lucru (după focar) în mediul ambiant, (kcal);

$I_{ate}$ = entalpia cantității teoretice de aer pentru ardere $V_0$ la temperatura de evacuare $t_e$, (kcal);

$\eta_{ip}^{r}$ = randamentul termic al procesului tehnologic în cazul arderii cu recirculație combinată, cu preîncălzirea aerului de ardere.

Pentru a se obține randamentul $\eta_{ip}^{r}$ este necesar să se parcurgă două etape de lucru. Astfel:

*a)* Se determină cantitatea de căldură $Q_{up}^{r}$, care nu este altceva decît căldura utilă ce ar rezulta făcînd abstracție de aerul fals intrat și pierderile de căldură în mediul ambiant, după focar, dar ținîndu-se seamă de arderea incompletă și de pierderile de căldură din focar în mediul ambiant.

*b)* Se determină căldura utilă, $Q_{up}^{r}$, ținînd seama de aerul fals și pierderile de căldură în mediul ambiant după focar, în afară de cele amintite la etapa *a)*

### *a)* Evaluarea căldurii utile $Q_{up}^{r}$

Așa după cum se remarcă din figura 2, căldura utilă $Q_{up}^{r'}$, este egală cu diferența între entalpiile cantității de gaze de ardere $V_{g0}$ la temperaturile $t_{fp}$ și $t_e$, deci

$$Q_{up}^{r'} = I_{fp}^{r} - I_e^{r} \qquad (3)$$

este reprezentată prin segmentul *gh*.

Pentru o anumită temperatură de preîncălzire $t_p$, deci pentru o anumită temperatură de ardere $t_{fp}$ se poate trasa curba $Q_{up}^{r'} = \psi(t)$, considerînd drept variabilă independentă temperatura de evacuare din cuptor $t_e$ (fig. 3).

Dacă și temperatura de preîncălzire variază luînd valorile $t_{p_1}$, $t_{p_2}$, ... se pot trasa în mod similar curbele: $Q_{up}^{r'} = \psi_1(t)$, $Q_{up}^{r'} = \psi_2(t)$... paralele cu $Q_{up}^{r'} = \psi(t)$, paralelismul fiind înțeles pe verticală.

Deci în cazul arderii normale realizată la coeficientul de exces de aer optim $\alpha_0$ se poate varia temperatura din focar prin modificarea temperaturii de preîn-

călzire. Pentru a se obține temperatura $t_f$ cerută de procesul tehnologic, va trebui adusă în focar cantitatea de gaze recirculate $\rho V_g$, efectuîndu-se arderea cu recirculație.

Dacă nu se preîncălzește aerul de ardere, variația temperaturii din focar se poate obține în cazul arderii normale în special prin modificarea coeficientului de exces de aer.

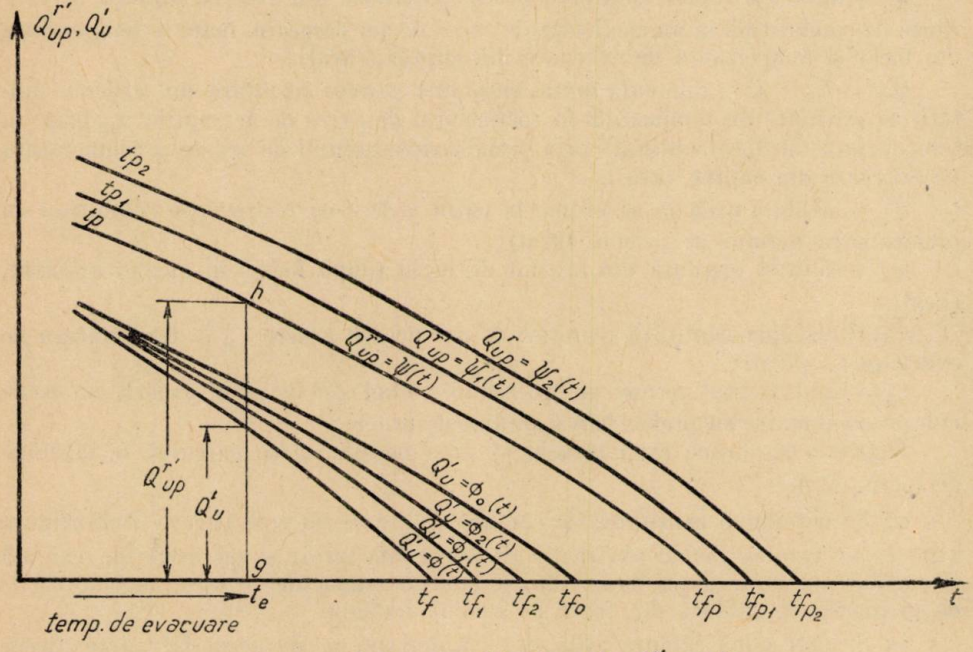



Fig. 3. — Evaluarea căldurilor utile $Q^{r'}_{up}$ și $Q'_u$.

În figura 3, s-au trasat și curbele $Q'_u = \Phi(t)$,

$Q'_u = \Phi_1(t)$, $Q'_u = \Phi_2(t)$, $Q'_u = \Phi_0(t)$ corespunzătoare temperaturilor din focar $t_f$, $t_{f_1}$, $t_{f_2}$, $t_{f_0}$.

### *b)* Evaluarea căldurii utile $Q^r_{up}$

Dacă se aspiră cantitatea de aer fals $\Delta\alpha\ V_0$ după spațiul de ardere, acesta va absorbi din căldura utilă $Q^{r'}_{up}$ cantitatea de căldură necesară încălzirii de la temperatura ambiantă $t_a$ la temperatura de evacuare $t_e$, adică:

$$\delta I_a = (I_{ae} - I_{ata}) \cdot \Delta\alpha$$

reprezentată în figura 4 prin segmentul $i_{\hat{a}}$.

Dacă se suprapune peste figura 3 familia de curbe $\xi(t) = \delta I_a + Q_p$, unde $Q_p$ este cantitatea de căldură pierdută din spațiul de lucru în mediul ambiant după focar, apare posibilitatea de a se scădea grafic suma arătată, din $Q^{r'}_{up}$ obținînd-se $Q^r_{up}$ (fig. 5).

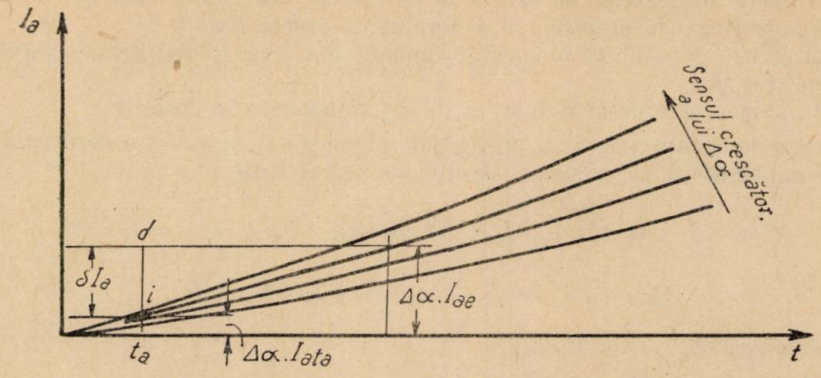



Fig. 4. — Determinarea cantității de căldură $\delta I_a$ .

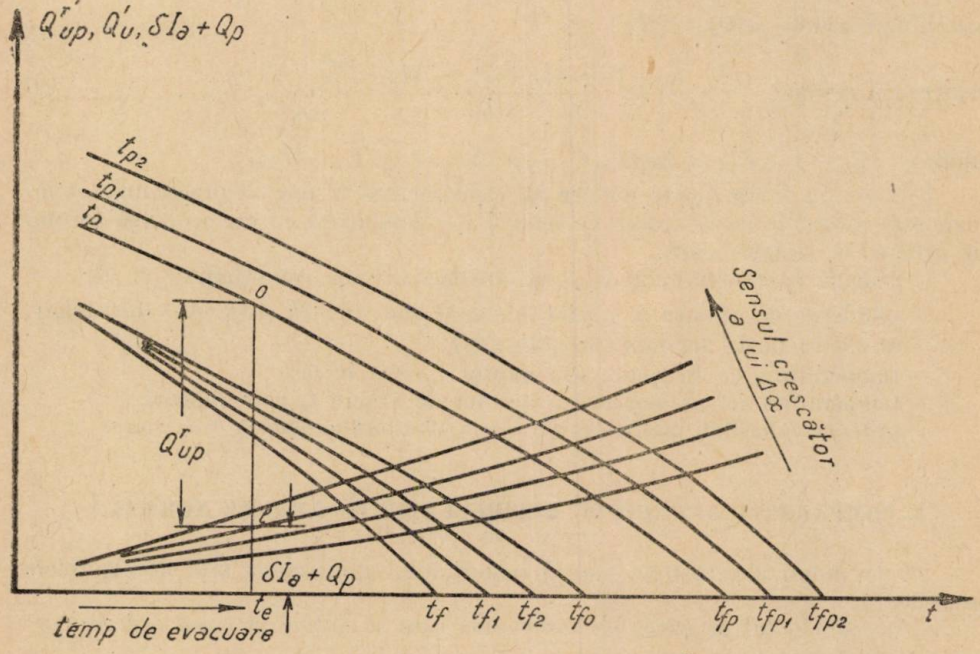



Fig. 5. — Evaluarea căldurii utile $Q^r_{up}$ .

În figura 5 segmentul *lo* reprezintă căldura utilă în cazul cînd:
— temperatura gazelor de ardere la evacuarea din cuptor este $t_e$;
— temperatura de preîncălzire a aerului de ardere este $t_p$
— pierderile de căldură în mediul ambiant din focar și spațiul de lucru sînt $k \cdot H_i$ respectiv $Q_p$;
— randamentul arderii în focar $\eta_f$, iar temperatura în focar $t_f$.

Ecuația de bilanț termic a procesului tehnologic*) în cazul arderii cu recirculație combinată cu preîncălzirea aerului de ardere este

$$Q_d + I^r_{la} + \Delta\alpha \cdot I_{ala} + \rho \cdot I_e + \Delta I_p = Q^r_{up} + Q_p + (1 + \rho) I_e \quad **) \tag{4}$$

sau

$$Q_d + I^r_{la} + \Delta\alpha \cdot I_{ala} + \Delta I_p = Q^r_{up} + Q_p + I_e \tag{5}$$

ținînd seamă că $I_e = I^r_e + \Delta\alpha \cdot I_{ale}$,
iar $\Delta\alpha \cdot (I_{ale} - I_{ala}) = \delta I_a$,
atunci ecuația (5) devine:

$$Q^r_{up} = Q_d + I^r_{la} + \Delta I_p - I^r_e - \delta I_a - Q_p. \tag{6}$$

Randamentul termic al procesului tehnologic pentru această situație este

$$\eta^r_{tp} = \frac{Q^r_{up}}{H_i} \tag{7}$$

sau ținînd seama ca $Q_d = qH_i$

relația (7) devine: $$\eta^r_{tp} = q \frac{I^r_e + \delta I_a + Q_p - \Delta I_p - I^r_{la}}{H_i}, \tag{8}$$

unde $q = \eta_f - k$ ; $\delta I_a = \Delta\alpha\,(I_{ale} - I_{ala})$; $\Delta I_p = \alpha_0\,(I_{ap} - I_{ala})$.

Din relația (8) se poate deduce că randamentul termic al procesului tehnologic este ridicat în cazul arderii cu recirculație combinată cu preîncălzirea aerului de ardere, în situația cînd:
— arderea combustibilului în focar are loc în bune condițiuni ($\eta_f \approx 1$);
— pierderile de căldură în mediul ambiant sînt mici ($k$ și $Q_p$ au valori mici);
— se aspiră puțin aer fals ($\Delta\alpha$ este mic);
— temperatura de evacuare din cuptor $t_e$ este mică;
— temperatura de preîncălzire a aerului de ardere $t_p$ este ridicată;
— puterea calorifică inferioare $H_i$ a combustibilului folosit este mare.

### 3. COMPARAȚIA ARDERII CU RECIRCULAȚIE CU ARDERE NORMALĂ

Se vor folosi următoarele notații importante, suplimentar față de capitolele precedente:

$\alpha_f$ = coeficientul de exces de aer pentru care se obține în cazul arderii normale temperatura $t_f$;

*) Se referă la procesul tehnologic care are loc în cuptor.
**) Se referă la acele cuptoare pentru care căldura dezvoltată prin reacțiile exoterme și cea absorbită prin reacțiile endoterme se poate neglija.

$p_{tot}$ = presiunea totală dezvoltată de ventilatorul care recirculă gazele de ardere (mm col. apă);

$X_b$ = economia de combustibil bruto în procente, ce se obține față de arderea normală, prin aplicarea arderii cu recirculație;

$z_b$ = economia de combustibil bruto în procente, ce se obține față de arderea normală, prin aplicarea arderii cu recirculație combinată cu preîncălzirea aerului de ardere;

$z_n$ = economia de combustibil neto în procente, ce se obține față de arderea normală, prin aplicarea arderii cu recirculație combinată cu preîncălzirea aerului de ardere;

$Q_u$ = căldura utilă ce se obține în cazul arderii normale, $\left(\frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3}\right)$;

$Q_u^r$ = căldura utilă ce se obține în cazul arderii cu recirculație, $\left(\frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3}\right)$;

$Q$ = cantitatea de căldură necesară produsului tehnologic pentru a se încălzi timp de o oră, $\left(\frac{\text{kcal}}{\text{h}}\right)$;

$c_s$ = consumul specific de combustibil convențional, $\left(\frac{\text{kg}}{\text{kWh}}\right)$;

$B$ = consumul de combustibil orar în cazul arderii normale, $\left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}\right)$;

$B_p^r$ = consumul de combustibil orar în cazul arderii cu recirculație combinată cu preîncălzirea aerului de ardere, $\left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}\right)$;

$D_g$ = debitul de gaze recirculate la temperatura de evacuare din cuptor $t_e$ $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right)$;

$P$ = puterea consumată de ventilator pentru vehicularea gazelor recirculate (kW).

### a. Diferența dintre $Q_{up}^r$ și $Q_u$, $Q_u^r$

Așa după cum s-a mai arătat, se face ipoteza că introducerea gazelor recirculate în spațiul de ardere nu conduce la o pierdere suplimentară de căldură, deoarece gazele recirculate se evacuează la temperatura cu care au intrat în focar*). Situația se petrece astfel încît cantitatea de căldură $\rho \cdot I_e$ parcurge un circuit închis.

Prin acest procedeu, căldura absorbită în focar prin încălzirea gazelor recirculate este cedată integral, prin răcirea spațiului de lucru, astfel încît dacă se preîncălzește aerul de ardere la temperatura $t_p$, căldura utilă $Q_{up}^r$ are aceeași valoare ca și cînd în focar ar fi temperatura $t_{fp}$ (fig. 6).

Temperatura $t_f$ cerută de procesul tehnologic în focar se poate obține:

— în cazul arderii normale arzînd combustibilul la coeficientul de exces de aer $\alpha_f > \alpha_0$, obținîndu-se căldura utilă, $Q_u$ (segmentul $lm$);

*) Se neglijează pierderile de căldură în instalația de vehiculare a gazelor recirculate.

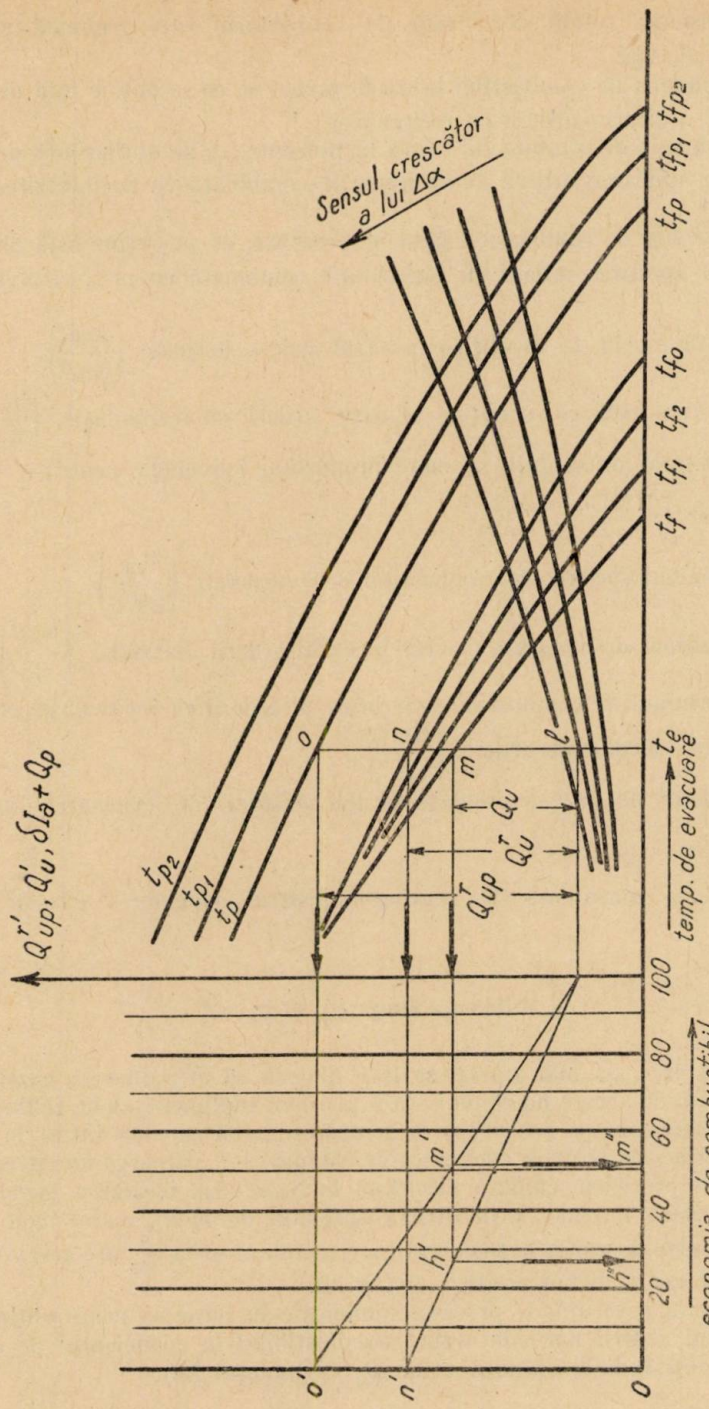



Fig. 6. — Determinarea parametrilor $Q_u$, $Q'_u$, $Q'_{up}$, $x_b$, $z_b$.

— în cazul arderii cu recirculație combinată cu preîncălzirea aerului de ardere, recirculîndu-se cantitatea de gaze $\rho \cdot V_g$ și obținîndu-se căldura utilă $Q_{up}$ (segmentul $l_0$);

— în cazul arderii cu recirculație fără preîncălzirea aerului de ardere recirculîndu-se mai puține gaze ca în exemplul precedent și obținîndu-se căldura utilă $Q_u^r$ (segmentul $lm$).

Diferența*) dintre căldurile utile $Q_{up}^r$ și $Q_u^r$ (segmentul $no$) este dată de căldura absorbită de aerul de ardere $\alpha_0 V_0$ pentru a se încălzi de la temperatura ambiantă $t_a$ pînă la temperatura $t_p$.

Diferența dintre căldurile utile $Q_u^r$ și $Q_u$ este dată de cantitatea de căldură absorbită de cantitatea de aer $(\alpha_f - \alpha_0)\, V_0$ pentru a se încălzi de la temperatura ambiantă $t_a$ la temperatura de evacuare din cuptor $t_e$.

Arderea cu recirculație combinată cu preîncălzirea aerului de ardere se poate utiliza și atunci cînd se urmărește obținerea în focar a unei temperaturi superioare temperaturii $t_{f0}$, ce s-ar obține prin arderea normală la coeficientul de exces de aer optim $\alpha_0$. Astfel dacă se preîncălzește aerul de ardere la temperatura $t_{p_2}$ și se urmărește obținerea în focar a temperaturii $t_{fp}$, atunci prin gazele recirculate va trebui să se absoarbă cantitatea de căldură necesară aerului de ardere pentru a se încălzi între temperaturile $t_p$ și $t_{p_2}$.

### b. Determinarea economiei de combustibil neto

Mai întîi se va calcula economia de combustibil bruto ce rezultă din aplicarea arderii cu recirculație combinată cu preîncălzirea aerului de ardere, față de arderea normală.

Dacă produsul tehnologic pentru a fi încălzit timp de o oră necesită cantitatea de căldură $Q$, atunci la arderea normală:

$$Q = B \cdot Q_u,$$

de unde rezultă consumul de combustibil orar

$$B = \frac{Q}{Q_u}. \tag{9}$$

La arderea cu recirculație combinată cu preîncălzirea aerului de ardere, în mod similar:

$$Q = B_p^r \cdot Q_{up}^r,$$

de unde rezultă consumul de combustibil orar

$$B_p^r = \frac{Q}{Q_{up}^r}. \tag{10}$$

*) Afirmațiile ce se vor face în continuare sînt riguroase atunci cînd $k$, $\eta_f$, $Q_p$ au aceleași valori în cazul arderii normale și în cazul arderii cu recirculație cu și fără preîncălzirea aerului de ardere.

Economia de combustibil bruto pe oră este:

$$\Delta B_b = B - B_p^r = Q \cdot \frac{Q_{up}^r - Q_u}{Q_{up}^r \cdot Q_u} \cdot \tag{11}$$

În procente, economia de combustibil bruto este

$$Z_b = \frac{\Delta B_b}{B} \cdot 100$$

sau ținînd seama de relațiile (9) și (11)

$$Z_b = \frac{Q_{up}^r - Q_u}{Q_{up}^r} \cdot 100. \tag{12}$$

Din figura 6 se poate determina

$$Z_b = \frac{lo - lm}{lo} 100 = \frac{mo}{lo} 100 \ldots \tag{13}*)$$

Ținînd seama că raportul segmentelor $\frac{mo}{lo}$ este egal cu raportul segmentelor $\frac{m'o'}{l'o'}$ se poate obține grafic în stînga figurii 6, parametrul $z_b$ (valoarea lui $z_b$ este precizată de poziția punctului $m''$).

În mod similar economia de combustibil ce rezultă din aplicarea arderii cu recirculație față de arderea normală este

$$X_b = \frac{Q_u^r - Q_u}{Q_u^r} \cdot 100 = \frac{mn}{ln} \cdot 100. \tag{14}$$

Diferența dintre economiile de combustibil bruto rezultate din aplicarea arderii cu recirculație cu și fără preîncălzirea aerului de ardere, față de arderea normală este:

$$\Delta e_b = Z_b - X_b = Om'' - Oh''.$$

Pentru determinarea economiei neto de combustibil, va trebui ca din economia bruto să se scadă echivalentul energiei absorbite de instalația de vehiculare a gazelor recirculate.

Situîndu-ne în cazurile în care gazele recirculate sînt vehiculate cu ajutorul unui ventilator, echivalentul energiei consumate de ventilator în combustibilul ars în cuptor, se obține după cum se va arăta în continuare.

---

*) Atunci cînd parametrii $\eta_f$, $k$, $Q_p$ variază sensibil în funcție de regimul de lucru din focar, pentru a se obține un rezultat precis, parametrul $z_b$ se va calcula din relația (12) în mod analitic, folosind expresiile căldurilor utile $Q_{up}^r$ și $Q_u$.

Dacă $p_{tot}$ este presiunea totală dezvoltată de ventilatorul ce vehiculează gazele recirculate, puterea consumată de ventilator, exprimată în kW, rezultă din relația

$$P = \frac{D_g \cdot P_{tot}}{3600.102\,\eta_{ins}}, \tag{15}$$

unde $D_g$ este debitul de gaze vehiculate, iar $\eta_{ins}$, randamentul instalației. După cum se știe debitul de gaze recirculate în cazul arderii cu recirculație combinată cu preîncălzirea aerului de ardere este

$$D_g = \rho \cdot B_p^r \cdot V_g \cdot \left(1 + \frac{t_e}{273}\right). \tag{16}$$

Cunoscînd consumul specific de combustibil convențional $c_s$ exprimat în $\frac{kg}{kWh}$, se poate obține valoarea acestuia exprimată în $\frac{kcal}{kWh}$ sub forma $7000\,c_s$ *).

Echivalentul energiei consumate de ventilator în combustibilul ars în focar este:

$$B_v = \frac{7000\,c_s\,P}{H_i}.$$

Economia netă de combustibil este

$$\Delta B_n = \Delta B_b - B_v \text{ **)}$$

sau în procente

$$x_n = \frac{\Delta B_n}{B} 100. \tag{17}$$

În majoritatea cazurilor practice, consumul suplimentar de energie pentru vehicularea gazelor recirculate este mic, astfel încît numai economia bruto de combustibil ne dă o imagine clară, asupra avantajelor aplicării arderii de recirculație combinată cu preîncălzirea aerului de ardere.

## 4. CORECȚIA REZULTATELOR

Față de capitolele precedente se vor folosi în mod suplimentar următoarele notații:

$\delta\alpha$ = creșterea coeficientului de exces de aer de la valoarea $\alpha$ la valoarea $\alpha'$, datorită aerului fals aspirat de gazele recirculate;

$t'_e$ = temperatura gazelor recirculate la intrarea în focar, (°C);

$\Delta I'_f$ = cantitatea de căldură absorbită de gazele recirculate prin încălzirea între temperaturile $t'_e$ și $t_f$, astfel încît să se răcească cantitatea de gaze de ardere $V_{g0}$ pînă la temperatura $t_f$ (kcal);

*) Puterea calorifică a combustibilului convențional s-a luat $7\,000\left(\frac{kcal}{kg}\right)$.

**) De fapt economia de combustibil neto este mai mare, atunci cînd în cazul arderii normale ventilatorul furnizează cantitatea suplimentară de aer necesară răcirii focarului pînă la temperatura cerută de procesul tehnologic.

$Q'_p$ = căldura pierdută în mediul ambiant de către gazele recirculate necesare răcirii cantității de gaze de ardere $V_{g0}$ pînă la temperatura $t_f$ (kcal);

$Q^{rp}_{up}$ = căldura utilă ce se poate obține în cazul arderii cu recirculație combinată cu preîncălzirea aerului de ardere, atunci cînd gazele recirculate pierd în mediul ambiant căldura $Q'_p$ (kcal/Nm³);

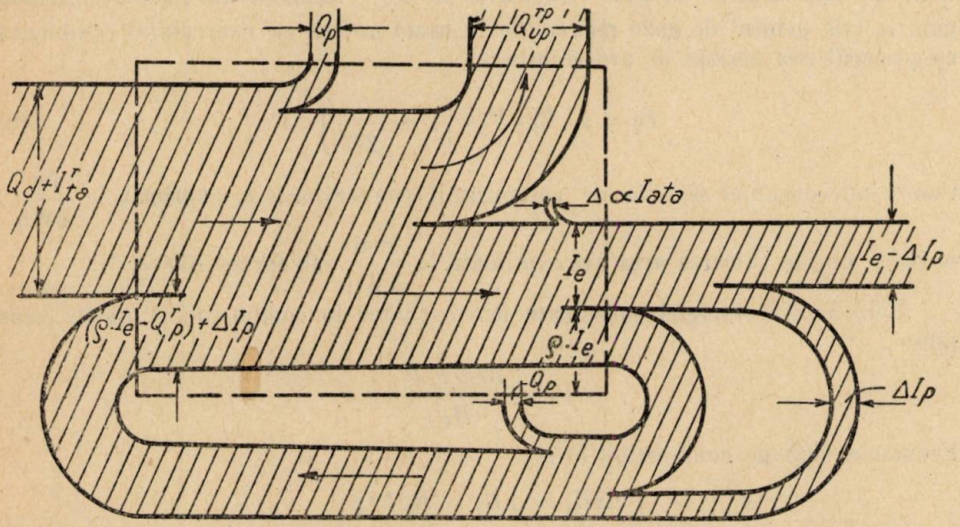



Fig. 7. — Schema termică în cazul arderii cu recirculație combinată cu preîncălzirea aerului de ardere, considerînd pierderile de căldură $Q'_p$.

$\rho'$ = proporția de gaze recirculate în cazul arderii cu recirculație combinată cu preîncălzirea aerului de ardere, atunci cînd se ține seama de pierderile de căldură $Q'_p$.

Considerațiile ce s-au făcut pînă la acest capitol referitor la arderea cu recirculație au la bază printre altele și ipotezele că:

— temperatura gazelor recirculate la intrarea în focar are aceeași valoare ca la evacuarea din cuptor;

— din cantitatea de gaze $\rho V_g$ nu se pierde nimic prin recirculare.

În realitate aceste ipoteze nu sînt îndeplinite, riguros, astfel că din cantitatea de căldură $\rho I_e$ numai o parte $\rho I_e - Q'_p$ este adusă în focar prin recirculare.

Dacă pierderile de căldură $Q'_p$ nu pot fi neglijate, rezultatele obținute la capitolele precedente vor trebui corectate.

Astfel, admițînd cazul cel mai frecvent că nu se pierd gaze în instalația de recirculare, dar temperatura gazelor, la intrarea în focar, este $t'_e < t_e$, proporția de gaze recirculate va scădea de la valoarea $\rho$ la valoarea $\rho' = \dfrac{\Delta I_g}{\Delta I'_f}$, căci $\Delta I'_f > \Delta I_f$.

Este de remarcat că $\Delta I'_f$ se referă la gaze recirculate cu o compoziție chimică corespunzătoare coeficientului de exces de aer $\alpha' = \alpha + \delta\alpha$, atunci cînd se aspiră aer fals în instalația de recirculare. Uneori aerul poate fi introdus intenționat pentru:

— a scădea temperatura gazelor recirculate, astfel încît să poată fi vehiculate de ventilator;

— sau pentru a le mări conținutul de oxigen astfel încît gazele recirculate fiind introduse direct în arzătoare să îndeplinească funcția de aer pentru ardere.

Neglijînd entalpia aerului fals la temperatura ambiantă, conținutul de căldură al gazelor recirculate rămîne neschimbat, deci numai pierderile de căldură $Q_p'$ vor modifica valorile parametrilor

$$\rho,\ \eta_p^r,\ x_n$$

Pe baza schemei termice din figura 7, căldura utilă ce se obține în cazul arderii cu recirculație combinată cu preîncălzirea aerului de ardere — considerînd și căldura pierdută $Q_p'$ prin recircularea gazelor de ardere — este:

$$Q_{up}^{rp} = Q_p + I_{ta}^r + \Delta I_p - (I_e^r + \delta I_a + Q_p' + Q_p). \tag{18}$$

Comparînd relațiile (6) și (18) rezultă că:

$$Q_{up}^{rp} = Q_{up}^r - Q_p'. \tag{19}$$

Randamentul termic al procesului tehnologic cît și economia de combustibil neto se pot calcula după aceleași metode ca cele arătate la punctele 2 și 3, dacă se înlocuiește căldura utilă $Q_{up}^r$ prin căldura utilă $Q_{up}^{rp}$ dată de relația (19).

## CONCLUZII

Scopul final al lucrării este elaborarea unei metode de calcul a economiei de combustibil ce rezultă din aplicarea arderii cu recirculație combinată cu preîncălzirea aerului de ardere, față de arderea normală și arderea cu recirculație.

Metoda prezentată se pretează la două moduri de a o aplica:

— construind și apoi folosind nomograma de calcul din figura 6 valabilă în ipoteza că parametrii $k$, $\eta_f$, $Q_p$ au aceleași valori medii în cazul arderii cu recirculație și al arderii normale iar apoi utilizînd relația (17);

— utilizînd diagrama $I, t$ și relațiile (12) și (17). Se vor utiliza corecțiile indicate la punctul 4 atunci cînd este cazul.

Cu ajutorul metodei prezentate s-a făcut o comparație între cele trei procedee de ardere amintite anterior, luîndu-se drept criterii de comparație următoarele:

— aceleași valori pentru temperaturile de evacuare din cuptor și din focar;

— aceleași valori pentru parametri $k$, $\eta_f$, $Q_p$, iar cantitatea de combustibil și cantitatea de căldură transmisă pe oră produsului tehnologic rămîn neschimbate.

## К ОЦЕНКЕ ЭКОНОМИИ ТОПЛИВА В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРИМЕНЕНИЯ В ПЕЧАХ ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ГОРЕНИЯ С ВОЗДУХОПОДОГРЕВОМ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Цель работы состоит в разработке метода расчета экономии топлива, получающейся в результате использования рециркуляционного горения, комбинированного с воздухоподогревом, по сравнению с нормальным и рециркуляционным горением.

Представленный метод может быть применен двояким способом:

— путем построения и последующего использования расчетных номограмм (рис. 6) (применимых в предположении, что параметры $k$, $\eta_f$ и $Q_p$ имеют одинаковые средние значения как в случае рециркуляционного, так и нормального горения), и с использованием затем и зависимости (17);

— путем использования диаграммы $(I, t)$ и зависимостей (12) и (17).

В случае необходимости вводятся поправки, указанные в главе 4.

При помощи предложенного метода было сделано сопоставление трех вышеупомянутых способов горения, причем в качестве критерия для сравнения были взяты:

— одни и те же значения для температур газов, отходящих из печи и из топки;

— одни и те же значения для параметров $k$, $\eta_f$ и $Q_p$;

— одно и то же количество топлива и тепла, переданного в час технологическому материалу.

Главное преимущество метода заключается в устранении необходимости использования неточных и особо сложных формул.

## ОБЪЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1. — Определение количества тепла $\Delta I_p$.

Рис. 2. — Определение количества тепла $\Delta I_g$, $\Delta I_f$, $Q'_{up}$.

Рис. 3. — Определение полезного тепла $Q'_{up}$ и $Q_u$.

Рис. 4. — Определение количества тепла $\delta I_a$.

Рис. 5. — Определение полезного тепла $Q'_{up}$.

Рис. 6. — Определение параметров $Q_u$, $Q'_u$, $Q'_{up}$, $x_b$, $z_b$.

Рис. 7. — Тепловая схема в случае рециркуляционного горения, комбинированного с воздухоподогревом, с учетом потерь тепла $Q'_p$.

## CONTRIBUTION À L'ÉVALUATION DE L'ÉCONOMIE DE COMBUSTIBLE OBTENUE PAR L'APPLICATION, AUX FOURS, DE LA COMBUSTION À RECIRCULATION COMBINÉE AVEC LE PRÉCHAUFFAGE DE L'AIR DE COMBUSTION

### (RÉSUMÉ)

Le but final du travail est l'élaboration d'une méthode de calcul de l'économie de combustible, résultant de l'application de la combustion à recirculation, combinée avec le préchauffage de l'air de combustion, au lieu de la combustion normale ou de la combustion à recirculation.

La méthode présentée peut être appliquée de deux manières:

1. On peut construire et appliquer le nomogramme de la figure 6, valable dans l'hypothèse que les paramètres $k$, $\eta_f$ et $Q_p$ ont les mêmes valeurs moyennes dans le cas de la combustion à recirculation que dans celui de la combustion normale, et utiliser ensuite la relation (17).

2. On peut utiliser le diagramme $I$, $t$ et les relations (12) et (17), en introduisant les corrections appliquées au chapitre 4, lorsque cela est nécessaire.

Au moyen de la méthode présentée, on a comparé les trois procédés de combustion mentionnées, en raison des critériums suivants:

— mêmes valeurs des températures d'évacuation du four et du foyer;

— mêmes valeurs des paramètres $k, \eta_f$ et $Q_p$ ;

— même quantité de combustible et même quantité de chaleur transmise par heure au produit technologique.

Le principal avantage qu'offre la méthode présentée est qu'elle ne fait pas appel à l'emploi de formules, aussi imprécises que compliquées.

## EXPLICATION DES FIGURES

Fig. 1. — Evaluation de la quantité de chaleur $\Delta I_p$.

Fig. 2. — Evaluation des quantités de chaleur $\Delta I_g$, $\Delta I_f$ et $Q^{r'}_{up}$.

Fig. 3. — Evaluation des chaleurs utiles $Q^{r'}_{up}$ et $Q_u$.

Fig. 4. — Détermination de la quantité de chaleur $\delta I_a$.

Fig. 5. — Evaluation de la chaleur utile $Q^r_{up}$.

Fig. 6. — Détermination des paramètres $Q_u$, $Q^r_u$, $Q^r_{up}$, $x_b$, $z_b$.

Fig. 7. — Schéma thermique de la combustion à recirculation combinée avec le préchauffage de l'air de combustion, en tenant compte des pertes de chaleur $Q'_p$.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 1—2, 1956

*MAŞINI TERMICE*

# CONTRIBUŢIE LA STUDIUL MOTOARELOR CU ARDERE INTERNĂ PRIN INTERMEDIUL CIFRELOR CARACTERISTICE

DE

ADRIAN CĂLIN VASILESCU şi VICTOR PIMSNER

Motoarele cu ardere internă au ajuns în ultimul timp la o perfecţionare constructivă deosebită, ceea ce a dus la realizarea unor forme tipice, funcţie de putere, utilizare şi combustibil folosit. Această stabilizare a formelor conduce la o mare asemănare între motoarele de puteri diferite, dar de aceeaşi utilizare.

Asemănarea aceasta devine şi mai evidentă dacă se studiază o serie de parametri generali cum ar fi puterea, turaţia, diametrul cilindrului, cilindreea, greutatea motorului etc. În acest caz se constată că:

— unii parametri rămîn constanţi;
— unii parametri variază în limite restrînse;
— unii parametri variază după legi simple funcţie de mărimea geometrică a motorului.

Pe această constatare se bazează studiul motoarelor cu combustie internă prin intermediul similitudinii care porneşte de la o asemănare constructivă şi geometrică a motoarelor şi ajunge la asemănarea altor mărimi.

La maşinile la care intervine un singur fenomen (hidraulic, aerodinamic etc.) se pot stabili legi riguroase între parametri principali ai maşinii.

La motoarele cu combustie internă, mărimile generale sînt funcţie de:

— parametri termodinamici;
— parametri constructivi;
— parametri mecanici;
— parametri ai dinamicii gazului;
— parametri termici.

Multitudinea acestor parametri şi interdependenţa lor, nu permite stabilirea unor legi riguroase care să determine dependenţa parametrilor de mărimea geometrică a maşinii.

Problema se poate rezolva în mai multe etape:

— Se consideră o serie de maşini de puteri diferite, deci de mărimi diferite, dar avînd toate aceiaşi parametri constructivi; maşinile derivă una din alta printr-o mărire riguroasă la scară. Pentru construirea a două maşini din aceeaşi serie se poate folosi acelaşi desen (citit la două scări diferite). Prin mărirea la scară a maşi-

nilor toţi parametri care depind numai de dimensiile maşinilor (parametri geometrici, greutatea) variază după legi simple. Se numeşte această asemănare între două maşini similitudine geometrică. Se numesc toate maşinile care sînt similare geometric, seria maşinilor geometric similare. Este de menţionat că similitudinea geometrică riguroasă nu corespunde realităţii construcţiei de motoare termice.

— Se consideră, pe lîngă similitudinea geometrică, păstrarea, la toate maşinile, a aceleiaşi formule de ciclu de lucru şi realizarea aceleiaşi presiuni medii. Se obţin în acest mod maşini la care puterea, turaţia, rezistenţele, greutatea etc. variază după legi simple [1]. Se capătă astfel o serie de maşini similare geometric şi mecanic. Cu oarecare aproximaţie se regăsesc aceste legi la studiul motoarelor cu cilindri multipli, care au la bază aceeaşi formă constructivă de cilindru (în special la motoarele răcite cu aer).

— Se consideră cazul real, la care parametri constructivi şi termodinamici ai maşinilor similare oscilează în jurul unor valori medii. Studiul parametrilor generali duce la legi aproximative, statistice. Se obţin astfel serii de maşini aproximativ similare.

Considerăm cazul seriilor aproximativ similare, căci, în practică este greu să se realizeze serii riguros asemenea de motoare cu ardere internă, deoarece:

— nu se poate realiza, din motive constructive, o amplificare a dimensiunilor unei maşini în limite largi;

— din punct de vedere economic, există alte procedee mai ieftine să se realizeze motoare de puteri diferite.

Deşi în gama unei serii de maşini aproximativ similare, motoarele diferă aparent mult între ele, totuşi se pot stabili, aşa cum s-a arătat, legi de similitudine aproximative care să satisfacă următoarelor necesităţi puse de practică:

— aprecierea comparativă a calităţilor funcţionale, de durabilitate şi de utilizare ale diferitelor motoare [2], [3], [4], [5], [6];

—aprecierea evoluţiei unor tipuri de motoare şi a tendinţelor de dezvoltare [6], [7], [8];

— deducerea unor parametri principali necesari proiectului motorului cu piston [9], [10].

În articolul de faţă se caută să se aprecieze comparativ calităţile funcţionale, de durabilitate şi de utilizare ale diferitelor motoare, considerîndu-se o asemănare aproximativă în cadrul aceleiaşi utilizări pentru toate motoarele studiate.

În acest scop se stabileşte, pe baza teoremei «$\pi$» o ecuaţie adimensională între cinci mărimi generale.

Ecuaţia adimensională stabilită permite deducerea unei cifre de calitate a motorului.

Pornind de la ecuaţia adimensională stabilită, se dezvoltă în articol o serie de cifre caracteristice care sînt specifice unei serii de maşini aproximativ asemenea.

La baza acestui studiu se găseşte materialul statistic referitor la 540 de motoare cu aprindere prin scînteie [11], [12], [13], funcţionînd cu benzină şi fiind utilizate pe automobile, autocamioane, autobuze, tractoare, nave mici şi în utilizări industriale.

## 1. DETERMINAREA ECUAŢIEI ADIMENSIONALE

În scopul stabilirii unei relaţii între diferiţii parametri ai unui motor cu piston se aleg 5 parametri importanţi ai acestuia, pe care îi vom numi parametri principali:

$P$, puterea care exprimă efectul util al maşinii;

$D$, diametrul cilindrului, care exprimă dimensia mașinii;

$n$, turația, care poate exprima (împreună cu alți factori) durabilitatea și ancombramentul mașinii;

$V$, cilindreea, care exprimă cantitatea de combustibil aspirat (la dozaj constant);

$G$, greutatea, care poate exprima împreună cu alți parametri utilizarea materialului.

Acești parametri importanți pentru mașină îi vom considera variabili, iar ceilalți parametri ficși sau neglijabili, după importanța pe care o au fiecare dintre ei.

Se consideră că pentru aceeași serie de mașini, aproximativ similare, există o lege fizică care leagă acești parametri. Această lege fizică poate fi dedusă pe cale experimentală și prin intermediul ecuațiilor de dimensiuni. Cei 5 parametri studiați se măsoară în sistemul $MK_fS$ cu următoarele unități de măsură

$$\begin{array}{lll} P & \text{CP} & [\text{LFT}^{-1}], \\ D & \text{mm} & [\text{L}], \\ n & \text{min}^{-1} & [\text{T}^{-1}], \\ V & \text{dm}^3 & [\text{L}^3], \\ G & \text{kgf} & [\text{F}]. \end{array}$$

În cele ce urmează se va considera, pînă la stabilirea cifrelor caracteristice, că toate cele cinci mărimi considerate se măsoară în unitățile coherente ale sistemului mecanic tolerat (kgm $s^{-1}$, m, $s^{-1}$, $m^3$ și kgf).

Se admite că parametrii principali sînt legați printr-o lege fizică de tipul

$$kP^a D^b n^c V^e G^g = 1, \tag{1}$$

valabilă pentru toată seria de motoare aproximativ similare (unde $k$, $a$, $b$, $c$, $e$, $g$, urmează a fi deduși experimental).

Această lege poate fi obținută prin intermediul unor mărimi adimensionale scrise cu o îmbinare convenabilă a variabilelor care alcătuiesc ecuația (1).

Deoarece se studiază 5 parametri, care se măsoară cu 3 unități de măsură, independente (fundamentale), se va putea scrie conform teoremei $\pi$, $5-3=2$ mărimi adimensionale independente.

Pentru a găsi aceste mărimi se exprimă dimensional legea generală dintre parametrii principali, sub forma:

$$[-] = [\text{LFT}^{-1}]^a [\text{L}]^b [\text{T}^{-1}]^c [\text{L}^3]^e [\text{F}]^g. \tag{2}$$

Ca urmare a modului de scriere al ecuației (1) se obțin 3 relații între exponenții parametrilor principali:

$$\begin{array}{rl} a+b+3\,e & =0, \\ a+g & =0, \\ -a-c & =0. \end{array} \tag{3}$$

Sistemul de trei ecuații liniare (omogene) cu cinci necunoscute nu poate fi rezolvat deci prin particularizarea unor soluții. Pentru a rezolva sistemul se consideră pe rînd, că una din mărimi este la puterea zero și alta la puterea unu.

Făcînd toate combinările posibile se găsesc în final următoarele mărimi adimensionale exprimate în tabloul nr. 1.

*Tabloul nr. 1*

**Mărimi adimensionale**

| $a$ | $b$ | $c$ | $e$ | $g$ | formulă | dimensie |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | −1 | $-\frac{1}{3}$ | −1 | $\frac{P}{nV^{1/3}G}$ | $\frac{[LFT^{-1}]}{[T^{-1}]\,[L^3]^{1/3}\,[F]} = [-]$ |
| 1 | −1 | −1 | 0 | −1 | $\frac{P}{DnG}$ | $\frac{[LFT^{-1}]}{[L]\,[T^{-1}]\,[F]} = [-]$ |
| 0 | 1 | 0 | $-\frac{1}{3}$ | 0 | $\frac{D}{V^{1/3}}$ | $\frac{[L]}{[L^3]^{1/3}} = [-]$ |
| −1 | 1 | 1 | 0 | 1 | $\frac{DnG}{D}$ | $\frac{[L]\,[T^{-1}]\,[F]}{[LFT^{-1}]} = [-]$ |
| 0 | −3 | 0 | 1 | 0 | $\frac{V}{D^3}$ | $\frac{[L^3]}{[L]^3} = [-]$ |
| −3 | 0 | 3 | 1 | 3 | $\frac{n^3 VG^3}{F^3}$ | $\frac{[T^{-1}]^3\,[L^3]\,[F]^3}{[LFT^{-1}]^3} = [-]$ |
| −1 | 0 | 1 | $\frac{1}{3}$ | 1 | $\frac{nV^{1/3}G}{P}$ | $\frac{[T^{-1}]\,[L^3]^{1/3}\,[F]}{[LFT^{-1}]} = [-]$ |

Este uşor de arătat că cele şapte expresii din tabloul nr. 1 se reduc la două. Se aleg expresiile

$$\frac{D}{V^{1/3}} \tag{4}$$

şi

$$\frac{P}{nV^{1/3}G}. \tag{5}$$

Se observă că termenul $\frac{V}{D^3}$ din tabloul nr. 1 este inversul lui (4).

De asemenea produsul următor devine:

$$\frac{P}{DnG} \cdot \frac{D}{V^{1/3}} = \frac{P}{nV^{1/3}G}.$$

Restul expresiilor sînt inversul expresiilor studiate.
Se consideră că între expresiile (4) şi (5) există relaţia matematică

$$\frac{D}{V^{1/3}} = k\left(\frac{P}{nV^{1/3}G}\right)^m; \tag{6}$$

această expresie unde $k$ este o constantă şi $m$ exponent fix, urmează a fi dedusă pe bază de material statistic.

Ecuația (6) poate fi simplificată cu următoarele relații:

$$\frac{G}{P} = G_s \text{ — greutate specifică,}$$

$$V = \frac{\pi D^2}{4} s,$$

unde s-a notat cu $D$, diametrul cilindrului și cu $s$, cursa pistonului.

Relația (6) devine

$$\frac{D}{\left(\frac{\pi D^2}{4} s\right)^{1/3}} = k \left[ \frac{1}{n \left(\frac{\pi D^2}{4} s\right)^{1/3} G_s} \right]^m;$$

se introduce raportul dintre cursă și diametru

$$\psi = \frac{s}{D}$$

$$\frac{D}{\left(\frac{\pi}{4} D^3 \psi\right)^{1/3}} = k \left[ \frac{1}{n \left(\frac{\pi}{4\psi^2} s^3\right)^{1/3} G_s} \right]^m;$$

în această expresie se introduce valoarea vitezei medii a pistonului

$$w_m = \frac{ns}{30}$$

și se obține

$$\frac{D}{\left(\frac{\pi}{4} D^3 \psi\right)^{1/3}} = k \left[ \frac{1}{30 w_m \left(\frac{\pi}{4} \frac{1}{\psi^2}\right)^{1/3} G_s} \right]^m$$

sau, prin simplificări,

$$\left(\frac{4}{\pi}\right)^{1/3} \left(\frac{1}{\psi}\right)^{1/3} = k \left[ \frac{\psi^{2/3}}{30 \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/3} w_m G_s} \right]^m;$$

în sfîrșit,

$$\left(\frac{1}{\psi}\right)^{1/3} = k_1 \left[ \frac{\psi^{2/3}}{w_m G_s} \right]^m,$$

unde

$$k_1 = \frac{k}{\left(\frac{4}{\pi}\right)^{1/3} \left[ 30 \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/3} \right]^m},$$

sau

$$w_m G_s = k_2 \psi^p, \tag{7}$$

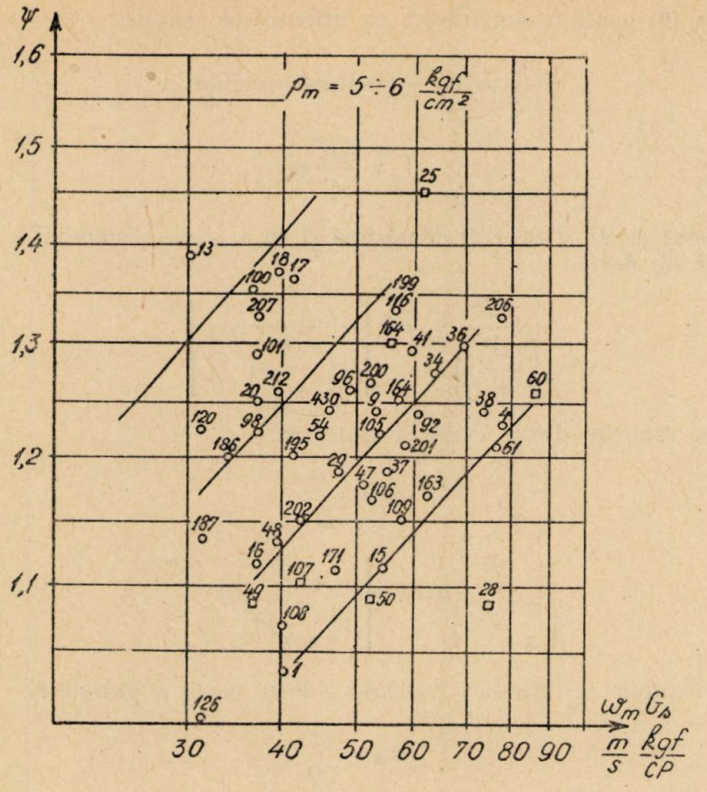



Fig. 1. — Diagrama statistică a dependenței raportului $\psi = \frac{s}{D}$ de produsul $w_m G_s$

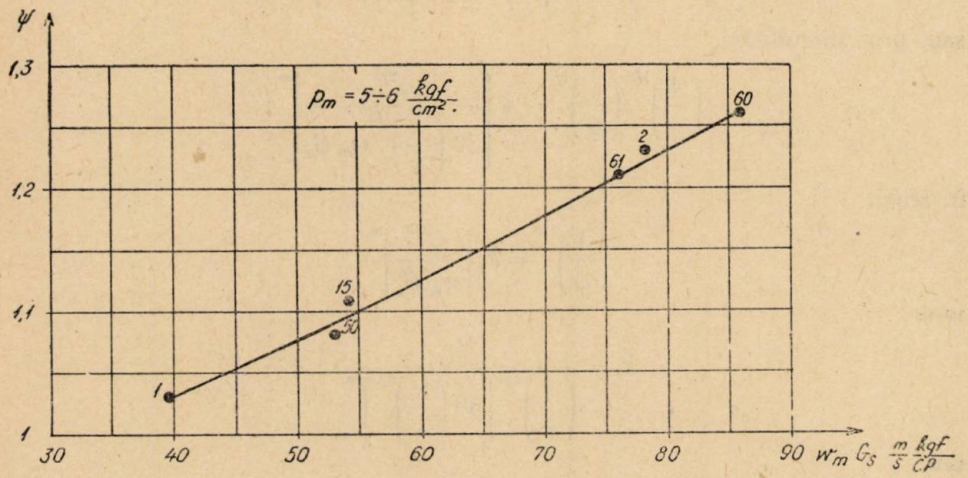



Fig. 2. — Diagrama $\psi$ funcție de $w_m G_s$ în coordonate rectangulare normale.

unde

$k_2 = k_1^{\frac{1}{m}}$ (ținîndu-se seama și de eventualele schimbări ale unității de măsură)

$$p = \frac{1}{3m} + \frac{2}{3}.$$

Ecuația (7) reprezintă legătura necesară dintre parametri principali ai unei serii de mașini aproximativi similare.

În figura 1 se reprezintă pentru o serie de mașini legea (7) în coordonate logaritmice. Se observă că între diversele valori se pot stabili legi liniare între coordonate logaritmice corespunzătoare ecuației (7). Aceste legi nu pot să aibă o importanță deosebită din cauză că leagă un parametru puțin interesant, raportul dintre cursă și diametru $\psi$, de produsul vitezei medii și a greutății specifice, parametri importanți.

Legea (7) pentru seria de motoare prezentate în figura 1 se poate scrie sub forma aproximativă

$$\log \psi = 0{,}01 \log w_m G_s - \text{const.}$$

În trasarea grafică a legii (7) s-au reprezentat motoarele aceleiași fabrici constructoare, spre exemplu (1,4). Pe aceeași curbă se situează însă și alte motoare realizate de alte case constructoare (50, 15, 61, 60). O analiză a parametrilor caracteristici ai acestor motoare nu a putut duce la o concluzie în această direcție; lipsind desenul motoarelor nu s-a putut evalua dacă este vorba de o similitudine constructivă.

În figura 2 se reprezintă legea (7) între punctele (1, 10, 15, 61, 2, 60) în coordonate rectangulare normale.

## 2. CIFRA ADIMENSIONALĂ CARACTERISTICĂ ȘI SEMNIFICAȚIA EI

Funcția (7) dedusă se poate cuprinde într-o cifră adimensională $\sigma$ a motorului cu piston

$$\sigma = k_2 \frac{\psi^p}{w_m G_s}. \tag{8}$$

Această cifră adimensională poate fi o măsură a calității a două motoare similare geometric sau relativ asemănătoare, dar avînd același raport $\psi$ între cursă și diametru.

Relația (8) se mai poate scrie

$$\sigma = k_3 \frac{P}{w_m G},$$

unde

$$k_3 = k_2 \psi^p \quad \text{iar} \quad G_s = \frac{G}{P};$$

considerînd expresia cunoscută

$$P = \frac{p_m V n}{900} \quad \text{și} \quad V = \frac{\pi D^2}{4} s$$

(unde s-a considerat pentru simplificare motorul cu un cilindru) se obţine

$$\sigma = k_3 \frac{p_m \frac{\pi D^2}{4} sn}{\frac{900}{w_m G}};$$

prin reducerea vitezei medii

$$\sigma = k_3 \frac{p_m \frac{\pi D^2}{4}}{30 G}$$

sau, în sfîrşit,

$$\sigma = k_4 \frac{f}{G} \tag{9}$$

unde s-a pus

$$p_m \frac{\pi D^2}{4} = f \quad \text{şi} \quad \frac{k_3}{30} = k_4.$$

Se observă că în expresia (9) intervine o forţă constantă $\left(f = p_m \frac{\pi D^2}{4}\right)$, care acţionînd o singură cursă din ciclu ar dezvolta acelaşi lucru mecanic ca şi cel real dezvoltat pe ciclu. Vom numi această forţă — asemănător cu presiunea respectivă — forţă medie.

Se observă uşor că la aceeaşi maşină, cu cît se măreşte forţa medie cu atît va creşte lucrul mecanic şi în consecinţă maşina utilizează optim materialul. Scăderea greutăţii maşinii duce la aceeaşi concluzie. Creşterea funcţiei (9) exprimă în ambele cazuri îmbunătăţirea calităţilor maşinii din punctul de vedere al utilizării materialului din care este alcătuită. Rezultă că expresia (9) poate fi considerată ca o cifră caracteristică a motoarelor cu piston. În tabloul nr. 2 se indică variaţia mărimilor caracteristice ale unor motoare diferite servind la utilizări maritime.

*Tabloul nr. 2*

**Parametrii motoarelor maritime**

| Nr. mot. | Nr. cil. | $D$ mm | $s$ mm | $\psi$ | $\varepsilon$ | $P$ CP | $n$ $\text{min}^{-1}$ | $G$ kgf | $p_m$ $\text{kgf/cm}^2$ | $w_m$ m/s | $G_s$ kgf/CP | $w_m G_s$ m/s·kgf/CP |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 347 | 6 | 127 | 146 | 1,15 | 5 | 185 | 2000 | 536 | 7,56 | 9,6 | 2,9 | 27,9 |
| 346 | 6 | 127 | 146 | 1,15 | 5,85 | 220 | 2400 | 536 | 7,42 | 11,7 | 2,44 | 28,6 |
| 344 | 6 | 127 | 146 | 1,15 | 6,20 | 212 | 2400 | 586 | 7,16 | 11,6 | 2,76 | 32,3 |
| 245 | 6 | 82,5 | 95,2 | 1,15 | 7 | 110 | 3600 | 338 | 9,02 | 11,4 | 3,07 | 35 |
| 255 | 6 | 127 | 146 | 1,15 | 5,70 | 225 | 2400 | 678 | 7,58 | 11,7 | 3,01 | 35,1 |
| 240 | 4 | 66,67 | 76,2 | 1,15 | 6 | 25 | 3400 | 117 | 6,22 | 8,7 | 4,7 | 41 |
| 254 | 6 | 127 | 146 | 1,15 | 5,70 | 200 | 2400 | 730 | 6,74 | 11,7 | 3,65 | 42,2 |
| 253 | 6 | 127 | 146 | 1,15 | 5,30 | 157 | 2000 | 710 | 6,34 | 9,6 | 4,04 | 43,2 |

Din tabloul nr. 2 se observă că mărirea presiunii medii este legată de micşorarea factorului $w_m G_s$ la $\psi$ = const. conform ecuaţiei (8). Totodată factorul studiat ţine seamă şi de viteza medie, lucru care se remarcă în natura variaţiei acestui factor. Se observă abateri de la regula generală de variaţie a lui $w_m G_s$, la motoarele 245 şi 240 care, avînd dimensiuni mai mici, se deosebesc de seria de maşini studiate.

(unde s-a considerat pentru simplificare motorul cu un cilindru) se obţine

$$\sigma = k_3 \frac{p_m \frac{\pi D^2}{4} sn}{\frac{900}{w_m G}};$$

prin reducerea vitezei medii

$$\sigma = k_3 \frac{p_m \frac{\pi D^2}{4}}{30 G}$$

sau, în sfîrşit,

$$\sigma = k_4 \frac{f}{G} \tag{9}$$

unde s-a pus

$$p_m \frac{\pi D^2}{4} = f \quad \text{şi} \quad \frac{k_3}{30} = k_4.$$

Se observă că în expresia (9) intervine o forţă constantă $\left(f = p_m \frac{\pi D^2}{4}\right)$, care acţionînd o singură cursă din ciclu ar dezvolta acelaşi lucru mecanic ca şi cel real dezvoltat pe ciclu. Vom numi această forţă — asemănător cu presiunea respectivă — forţă medie.

Se observă uşor că la aceeaşi maşină, cu cît se măreşte forţa medie cu atît va creşte lucrul mecanic şi în consecinţă maşina utilizează optim materialul. Scăderea greutăţii maşinii duce la aceeaşi concluzie. Creşterea funcţiei (9) exprimă în ambele cazuri îmbunătăţirea calităţilor maşinii din punctul de vedere al utilizării materialului din care este alcătuită. Rezultă că expresia (9) poate fi considerată ca o cifră caracteristică a motoarelor cu piston. În tabloul nr. 2 se indică variaţia mărimilor caracteristice ale unor motoare diferite servind la utilizări maritime.

*Tabloul nr. 2*

**Parametrii motoarelor maritime**

| Nr. mot. | Nr. cil. | $D$ mm | $s$ mm | $\psi$ | $\varepsilon$ | $P$ CP | $n$ $\text{min}^{-1}$ | $G$ kgf | $p_m$ $\text{kgf/cm}^2$ | $w_m$ m/s | $G_s$ kgf/CP | $w_m G_s$ m/s·kgf/CP |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 347 | 6 | 127 | 146 | 1,15 | 5 | 185 | 2000 | 536 | 7,56 | 9,6 | 2,9 | 27,9 |
| 346 | 6 | 127 | 146 | 1,15 | 5,85 | 220 | 2400 | 536 | 7,42 | 11,7 | 2,44 | 28,6 |
| 344 | 6 | 127 | 146 | 1,15 | 6,20 | 212 | 2400 | 586 | 7,16 | 11,6 | 2,76 | 32,3 |
| 245 | 6 | 82,5 | 95,2 | 1,15 | 7 | 110 | 3600 | 338 | 9,02 | 11,4 | 3,07 | 35 |
| 255 | 6 | 127 | 146 | 1,15 | 5,70 | 225 | 2400 | 678 | 7,58 | 11,7 | 3,01 | 35,1 |
| 240 | 4 | 66,67 | 76,2 | 1,15 | 6 | 25 | 3400 | 117 | 6,22 | 8,7 | 4,7 | 41 |
| 254 | 6 | 127 | 146 | 1,15 | 5,70 | 200 | 2400 | 730 | 6,74 | 11,7 | 3,65 | 42,2 |
| 253 | 6 | 127 | 146 | 1,15 | 5,30 | 157 | 2000 | 710 | 6,34 | 9,6 | 4,04 | 43,2 |

Din tabloul nr. 2 se observă că mărirea presiunii medii este legată de micşorarea factorului $w_m G_s$ la $\psi$ = const. conform ecuaţiei (8). Totodată factorul studiat ţine seamă şi de viteza medie, lucru care se remarcă în natura variaţiei acestui factor. Se observă abateri de la regula generală de variaţie a lui $w_m G_s$, la motoarele 245 şi 240 care, avînd dimensiuni mai mici, se deosebesc de seria de maşini studiate.

În cele ce urmează se prezintă rezultatele statistice pentru diferite motoare în cîmpul diagramelor logaritmice $\psi$, $w_m G_s$.

Pentru o comparare mai ușoară a tipurilor de motoare s-a trasat o formă simplificată a expresiei (8)

$$\sigma' = \frac{100\,\psi^4}{w_m G_s}, \tag{10}$$

care este valabilă la $\psi = \text{const}$. La această ecuație valorile mari ale lui $\sigma$ la $\psi = \text{const}$. exprimă îmbunătățirea calităților de utilizare ale motorului studiat.

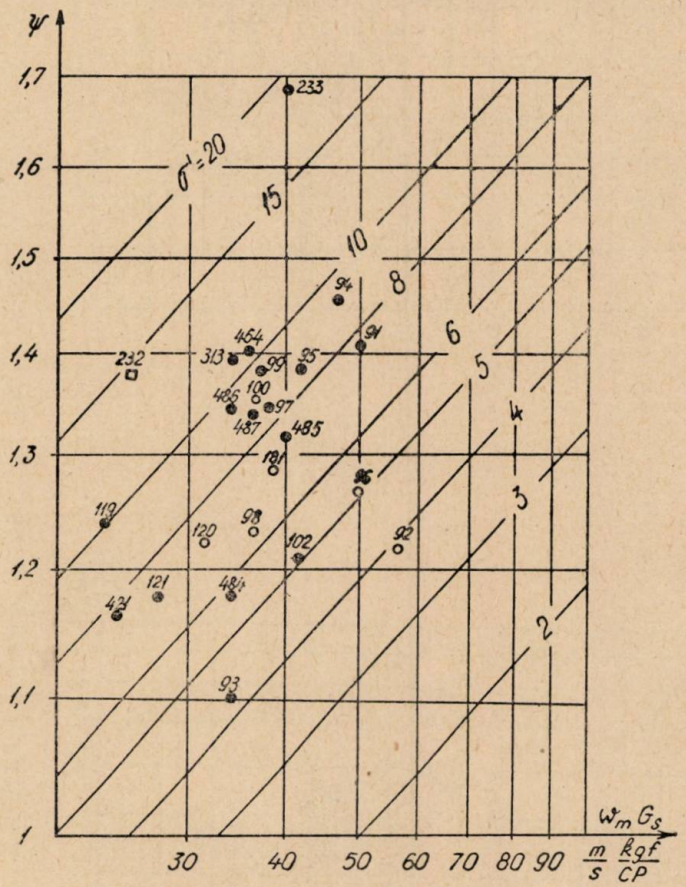



Fig. 3. — Diagrama $\psi$ funcție de $w_m G_s$ pentru motoarele de automobil (factorul $\sigma'$ parametru).

○ $p_m = 5-6\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ; ● $p_m = 6-7\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$.

Scopul diagramelor trasate este de a defini valoarea cifrei de calitate funcție de utilizarea motorului.

În figura 3 se prezintă diagrama pentru automobile. Se constată că majoritatea motoarelor de automobil au presiunile medii cuprinse între 6 și 7 kgf/cm² factorul $\psi$ cuprins între 1,3 și 1,4 și coeficientul $\sigma'$ între 8 și 12.

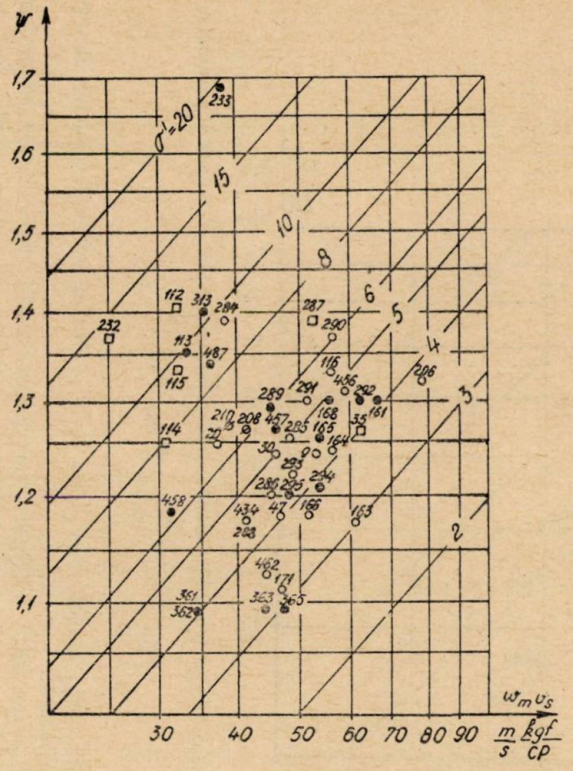



Fig. 4. — Diagrama $\psi$ funcție de $w_m G_s$ pentru motoarele de autocamion (factorul $\sigma'$ parametru).

⌀ $p_m = 4-5 \frac{kgf}{cm^2}$ ; ○ $p_m = 5-6 \frac{kgf}{cm^2}$ ; ● $p_m = 6-7 \frac{kgf}{cm^2}$ ;

□ $p_m = 7-8 \frac{kgf}{cm^2}$.

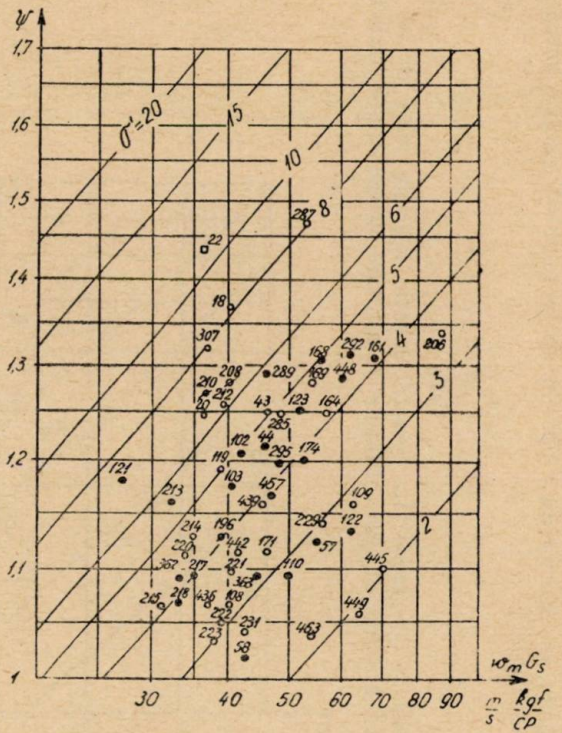



Fig. 5. — Diagrama $\psi$ funcție de $w_m G_s$ pentru motoarele de autobuz (factorul $\sigma'$ parametru).

⌀ $p_m = 4-5 \frac{kgf}{cm^2}$ ; ○ $p_m = 5-6 \frac{kgf}{cm^2}$ ; ● $p_m = 6-7 \frac{kgf}{cm^2}$ ;

□ $p_m = 7-8 \frac{kgf}{cm^2}$.

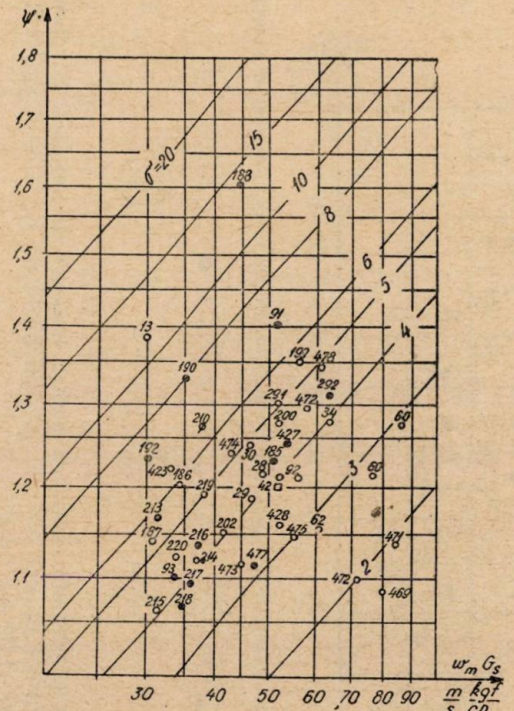



Fig. 6. — Diagrama $\psi$ funcţie de $w_m G_s$ pentru motoarele de tractor (factorul $\sigma'$ parametru).

⌀ $p_m = 4-5 \frac{kgf}{cm^2}$ ; ○ $p_m = 5-6 \frac{kgf}{cm^2}$; ● $p_m = 6-7 \frac{kgf}{cm^2}$.

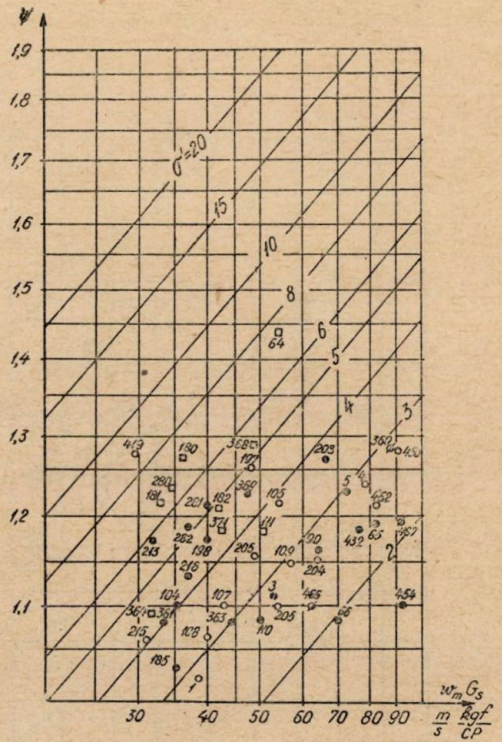



Fig. 7. — Diagrama $\psi$ funcţie de $w_m G_s$ pentru motoarele de tip industrial (factorul $\sigma'$ parametru).

⌀ $p_m = 4-5 \frac{kgf}{cm^2}$ ; ○ $p_m = 5-6 \frac{kgf}{cm^2}$ ;

● $p_m = 6-7 \frac{kgf}{cm^2}$ ; □ $p_m = 7-8 \frac{kgf}{cm^2}$ ; ⊙ $p_m = 8-9 \frac{kgf}{cm^2}$.

În figura 4 se prezintă diagrama pentru motoare de camion. Se observă o grupare a motoarelor de camion cu presiunii medii de $p_m = 5-6$ kgf/cm² între valorile $\psi = 1{,}15-1{,}33$ şi cifra $\sigma' = 4-5{,}5$.

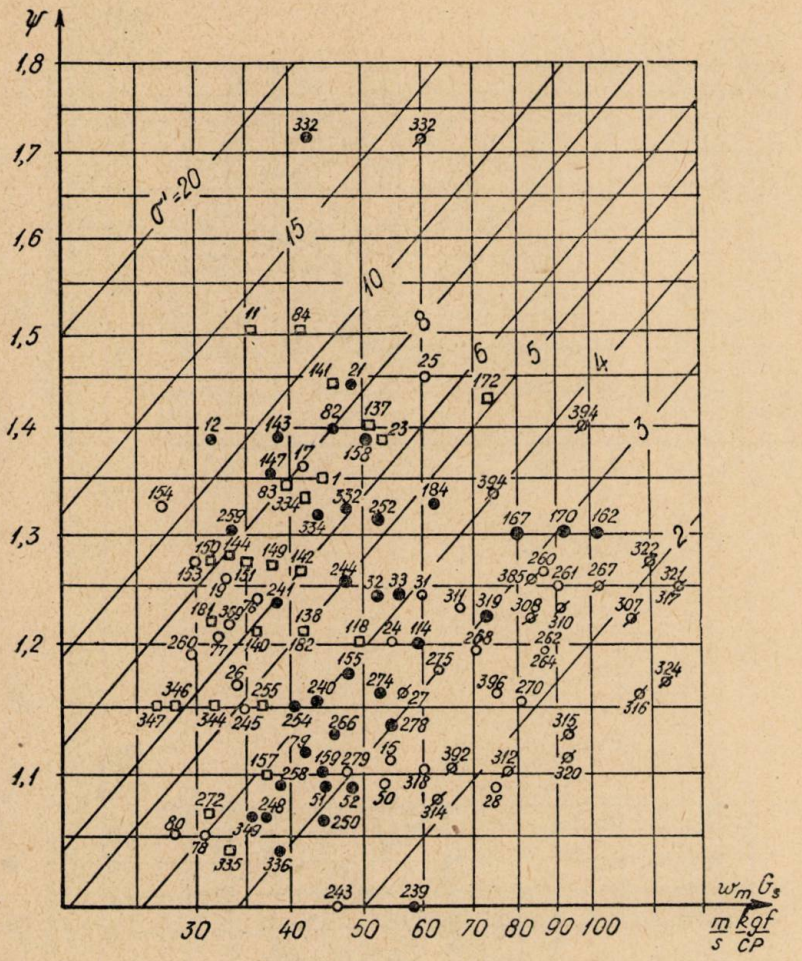



Fig. 8. — Diagrama $\psi$ funcţie de $w_m G_s$ pentru motoare de tip marin (factorul $\sigma'$ parametru)

$$\varnothing\ p_m = 4-5\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\ ;\quad \bigcirc\ p_m = 5-6\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\ ;\quad \bullet\ p_m = 6-7\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\ ;$$

$$\square\ p_m = 7-8\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\ ;\quad \odot\ p_m = 8-9\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\ .$$

În figura 5 se prezintă diagrama pentru motoare de autobuz. Se observă o grupare a motoarelor de autobuz cu presiuni medii de $p_m = 4-6$ kgf/cm², între valorile $\psi = 1{,}05-1{,}32$ şi cifra $\sigma' = 3-5$.

În figura 6 se prezintă diagrama pentru motoare de tractor. Se observă o grupare a motoarelor de tractor cu presiuni medii de $p_m = 5-6$ kgf/cm² între valorile $\psi = 1{,}06-1{,}35$ şi cifra $\sigma' = 3-6$.

În figura 7 se reprezintă diagrama pentru motoare de tip industrial. Se observă o dispersiune mai mare a motoarelor de tip industrial, ceea ce se explică prin multiplicitatea utilizărilor acestor tipuri de motoare.

În figura 8 se reprezintă diagrama pentru motoare de tip marin. Se observă o foarte mare dispersiune a acestor tipuri de motoare deși se pot delimita zone în funcție de presiunile medii. Se explică această mare dispersiune datorită cerințelor diferite puse motoarelor de tip marin.

## 3. CONDIȚIA DE SIMILITUDINE A MOTOARELOR GEOMETRIC ASEMENEA

Relația (8), anterior discutată, poate să pună o condiție interesantă în cadrul studiului mașinilor riguros asemenea.

Se pune condiția unor mașini asemenea geometric și constructiv. În acest caz raportul dintre cursă și diametru, $\psi$ = constant.

Se impune și asemănarea mecanică, prin urmare și presiunea medie $p_m$ este constantă.

Cu aceste ipoteze, expresia (8) devine

$$w_m G_s = K$$

sau prin înlocuirea mărimilor

$$\frac{ns}{30}\frac{G}{P} = K,$$

$$\frac{\frac{ns}{30}\,G}{p_m \frac{\pi D^2}{4}\,sn} = K,$$

$$\frac{}{900}$$

se obține

$$G = \frac{k}{30}\, p_m \frac{\pi D^2}{4}$$

sau

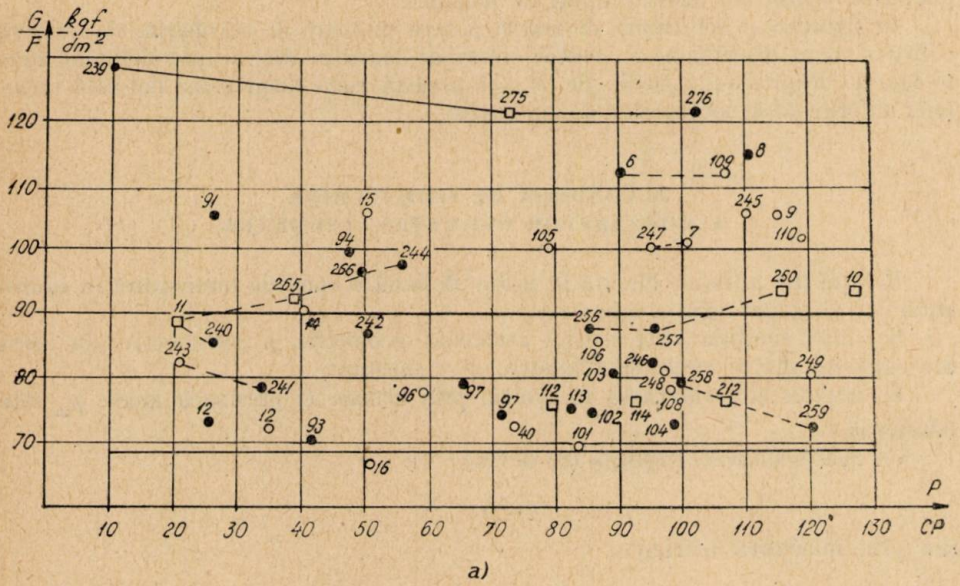
$$G = \text{const.}\ D^2. \tag{11}$$

Relația (11) ne arată că mașinile asemenea geometric și mecanic care satisfac legea (8) își variază greutatea proporțional cu pătratul unei dimensiuni caracteristice a mașinii. Vom numi aceste mașini, motoare aproximativ asemenea.

Dependența de pătratul dimensiei caracteristice a greutății, stabilită în acest articol, corespunde constatărilor lui P. I. Orlov [7]; o altă serie de autori [1], [9], [4] consideră că greutatea motorului variază cu cubul dimensiei caracteristice.

În figura 9 *a)* și *b)* se compară greutățile motoarelor de utilizare diferită, în figura 10 *a)* și *b)* se compară greutățile motoarelor de aceeași utilizare și de același raport $\psi$ între cursă și diametru.

S-au trasat diagramele în funcție de putere ale raportului dintre greutatea motorului și suprafața pistonului — greutatea pe unitatea de suprafață de piston și greutatea motorului raportată la volumul cilindreei — greutatea litrică a motorului.



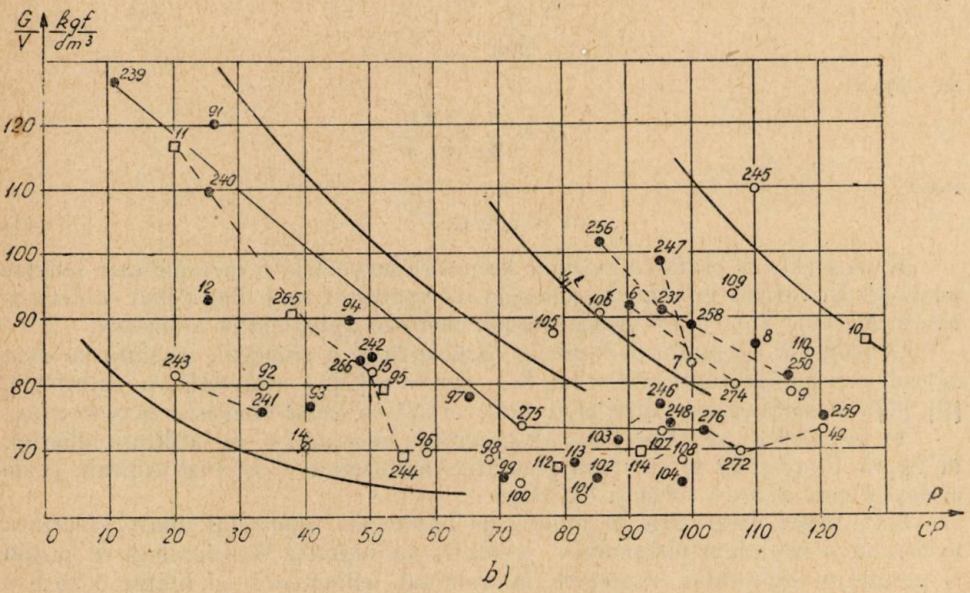




Fig. 9 *a)* și *b)*. — Greutățile motoarelor de utilizare diferită.

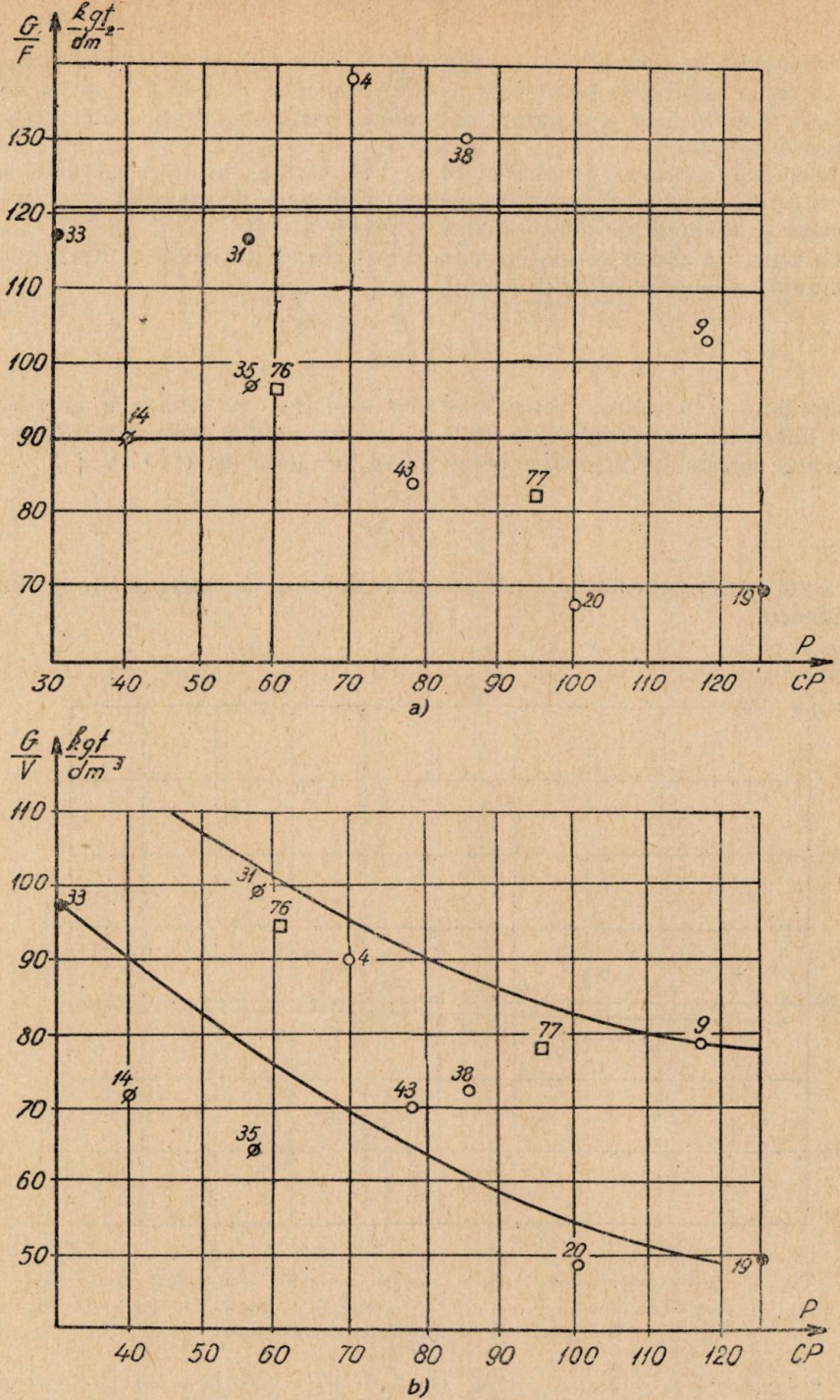



Fig. 10 *a)* și *b)*. — Greutățile motoarelor de aceeași utilizare și același raport între cursă și diametru.

Se observă uşor că greutatea raportată la suprafaţa pistonului variază aproximativ liniar la diverse mărimi de motor, ceea ce se explică prin aceea că atît greutatea motorului cît şi suprafaţa pistonului variază cu pătratul dimensiei caracteristice a maşinii.

În schimb greutatea litrică (fig. 10 *a)* şi *b)*) variază invers cu mărimea motorului datorită faptului că greutatea motorului depinde de dimensia caracteristică la pătrat şi volumul, de dimensia caracteristică la cub.

Ca urmare a acestei constatări, cifra caracteristică introdusă de K. Sanden şi denumită greutatea specifică a puterii [4]

$$g_s = \frac{G}{P^{3/2}} \tag{12}$$

ce reprezintă — în cadrul teoriei maşinilor similare — o variaţie a greutăţii cu cubul dimensiei caracteristice, ar trebui — pentru studiul maşinilor reale — înlocuită mai degrabă cu greutatea constructivă introdusă de Orlov [7]

$$g_k = \frac{G}{z(D^2 s)^{2/3}} \tag{13}$$

care arată variaţia greutăţii cu pătratul unei dimensii caracteristice ($z$ = numărul de cilindri).

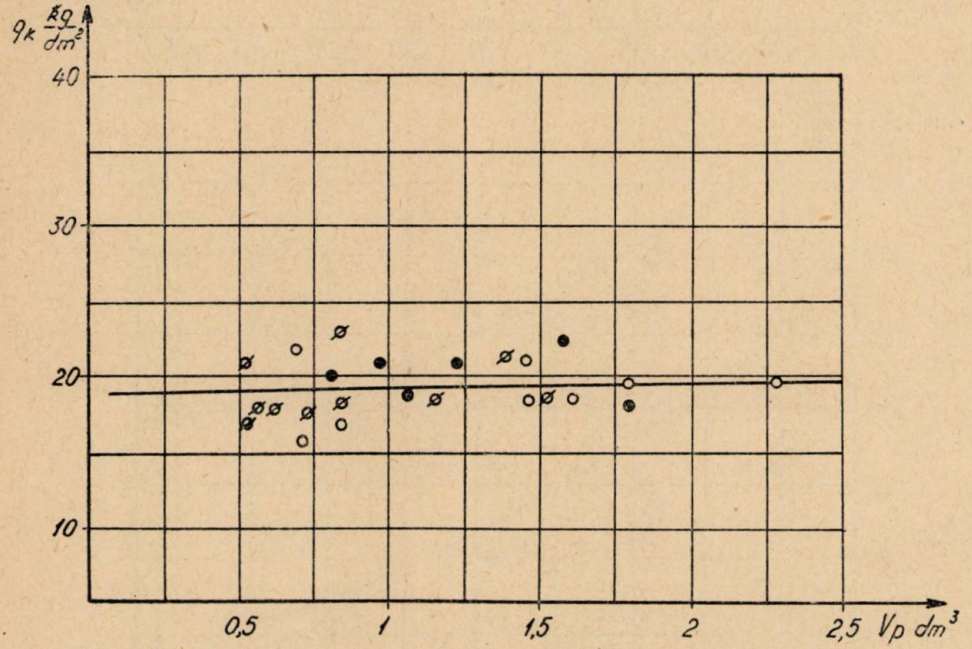



Fig. 11. — Greutatea constructivă a motoarelor de avion fără compresor.
○ motor în stea 5 cilindri răcit cu aer; ⌀ motor cu 4 cilindri în linie răcit cu aer;
● motor cu 6 cilindri în linie răcit cu aer.

În figura 11 se reproduce, după Orlov [7], variaţia greutăţii constructive pentru motoare de avion fără compresor în funcţie de cilindreea unui cilindru. Se evidenţiază clar dependenţa greutăţii de pătratul scării motorului.

## 4. CLASA DE MOTOARE ASEMENEA SIMILARE GEOMETRIC ȘI MECANIC, PROPUSĂ

Criteriul nou dedus pentru variația greutății motoarelor aproximativ asemenea, poate duce la crearea unei serii de mașini asemenea la care parametrii funcționali să varieze după legi bine precizate.

Condițiile impuse pînă acum dau

$$\begin{aligned} p_m &= \text{const.}, \\ \psi &= \text{const.}, \\ G &= f(r^2), \end{aligned} \tag{14}$$

unde $r = \frac{D_1}{D_2}$ reprezintă raportul dimensiei caracteristice a două mașini ale seriei.

Se pune condiția identității uzurilor la cele două mașini; presupunem că aceasta reprezintă egalitatea vitezei medii a pistonului, deci

$$\frac{n_1 s_1}{30} = \frac{n_2 s_2}{30},$$

de unde

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{n_2}{n_1} = r$$

(deoarece cursele mașinilor aceleiași serii variază în raportul diametrelor) și prin urmare

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{r} \tag{15}$$

turațiile variază invers proporțional cu scara mașinii.

Puterile celor două mașini ale seriei vor varia după legea

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\frac{p_m V_1 n_1}{900}}{\frac{p_m V_2 n_2}{900}} = \frac{V_1 n_1}{V_2 n_2},$$

$$\frac{P_1}{P_2} = r^3 \frac{1}{r},$$

$$\frac{P_1}{P_2} = r^2, \tag{16}$$

adică puterea mașinilor similare variază cu pătratul dimensiilor caracteristice ale mașinilor.

Din relația de definire a seriei de mașini asemenea

$$w_m G_s = \text{const.}$$

viteza medie fiind constantă, rezultă că și greutatea specifică trebuie să fie constantă.

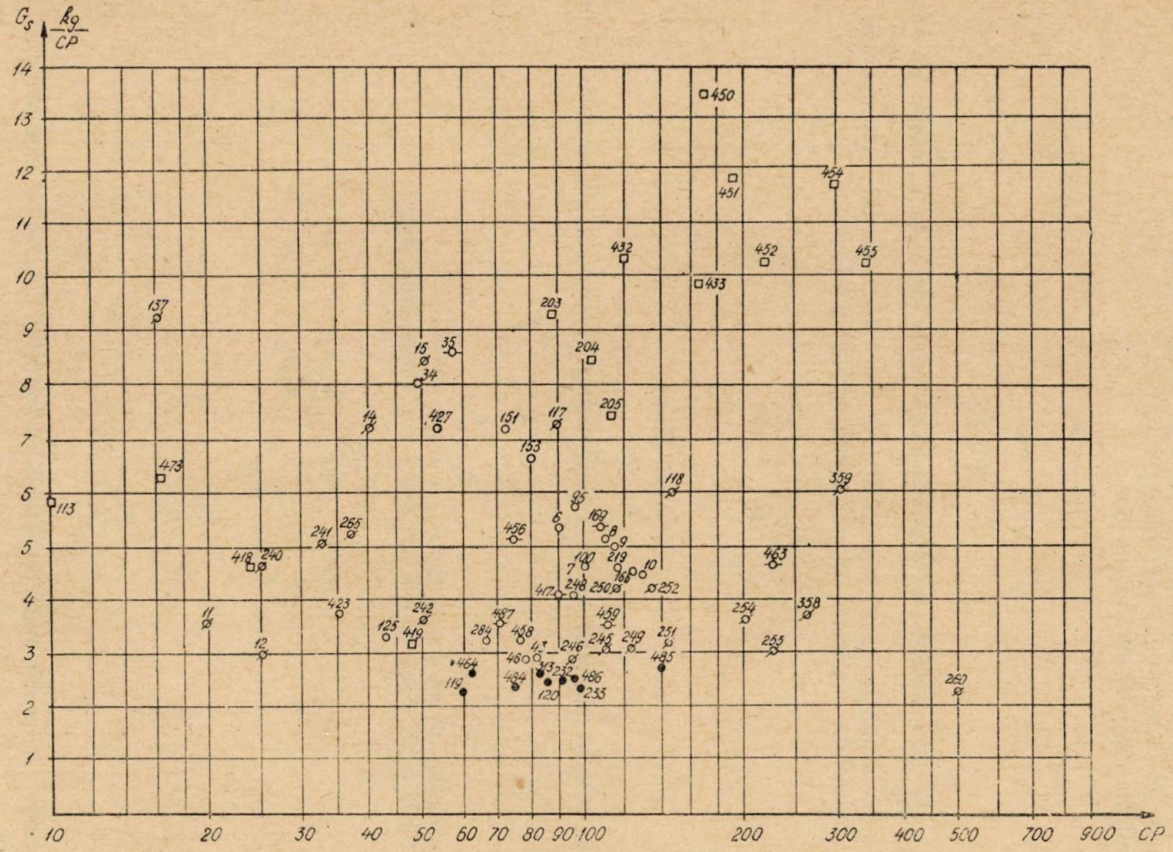



Fig. 12. — Greutatea specifică a motoarelor în funcție de putere.

● automobil; ⌀ marine; ⊙ camion; □ industriale; ○ tractor; ○ autobuz.

În figura 12 se reprezintă variația greutății specifice a motoarelor de diferite utilizări în funcție de puterea motoarelor. Se constată din această diagramă următoarele:

— Greutatea specifică a motoarelor de automobil variază între limite foarte strînse între valorile $2{,}3 - 3 \frac{\text{kgf}}{\text{CP}}$.

— Greutatea specifică a motoarelor marine este foarte dispersată datorită utilizărilor lor diferite. Totuși o analiză mai amănunțită va putea să arate grupe de motoare cu aceeași utilizare. Pentru aceste grupe de motoare greutatea specifică este o constantă (12, 246, 245, 249, 251, 255, 254, 358).

— Greutatea specifică a motoarelor de camion este și ea constantă, dar se prezintă grupată între mai multe limite

$$G_s = 2{,}9 - 3{,}3 \frac{\text{kgf}}{\text{CP}},$$

$$G_s = 4{,}2 - 5{,}5 \frac{\text{kgf}}{\text{CP}},$$

$$G_s = 7 \qquad \frac{\text{kgf}}{\text{CP}}.$$

— Greutatea specifică a motoarelor de tractor și în special a celor industriale nu urmează legi de păstrare a greutății specifice datorită diversității prea mari a tipurilor constructive și a utilizărilor.

Socotim că realizarea unei serii de mașini cu greutate specifică constantă corespunde necesităților motoarelor destinate tracțiunii, atunci cînd se analizează seriile de motoare aproximativ similare.

Din cele expuse rezultă tabloul nr. 3 de variație al parametrilor, cu scara seriei de mașini pentru similitudine directă (la care se consideră variația greutății cu cubul dimensiei) și similitudine stabilită în cadrul acestui articol.

*Tabloul nr. 3*

**Dependența parametrilor motorului de scara mașinilor**

| Parametru | Similitudinea directă | Similitudinea stabilită |
|---|---|---|
| $s$ | $r$ | $r$ |
| $D$ | $r$ | $r$ |
| $\psi$ | — | — |
| $n$ | $\frac{1}{r}$ | $\frac{1}{r}$ |
| $w_m$ | — | — |
| $V$ | $r^3$ | $r^3$ |
| $G$ | $r^3$ | $r^2$ |
| $G_s$ | $r$ | — |

Se constată că există diferențieri între clasa de mașini direct similare și clasa de mașini similare stabilită, numai unde intervine greutatea mașinii.

Prin urmare, toată teoria cunoscută asupra similarității fenomenelor gazodinamice în cadrul seriei de mașini, direct similare, rămîne valabilă în cadrul seriei de mașini similare după schema propusă.

Se cercetează problema eforturilor dinamice şi a rezistenţelor.

Oricum ar varia greutatea totală a maşinilor, greutatea echipajului mobil variază riguros după legea

$$G = k\,(r^3), \tag{17}$$

deoarece piesele echipajului mobil au fost mărite la scară. Prin urmare rezultatele cunoscute asupra identităţii rezistenţelor datorită presiunii gazelor, a presiunii forţelor de inerţie şi a vibraţiilor de torsiune se reproduc.

În consecinţă, noua clasă de maşini similare corespunde şi din punctul de vedere al rezistenţelor, principiului clasei de maşini similare:

« maşinile similare sînt motoarele de dimensii diferite la care toate dimensiile liniare omologe sînt în acelaşi raport şi care au rezistenţe şi eforturi mecanice egale » [1] *).

Socotim că noua serie de maşini similare corespunde mai bine studiului comparativ al motoarelor termice de tracţiune, deoarece corespunde tendinţei logice de a menţine constantă şi cît mai scăzută valoarea greutăţii specifice a motorului.

## 5. CIFRELE CARACTERISTICE ALE MOTOARELOR GEOMETRIC ŞI MECANIC ASEMENEA PROPUSE

În cadrul seriei de maşini asemenea se pot stabili uşor între parametrii principali studiaţi relaţii invariabile pentru toată seria de maşini.

Considerînd mărimile, funcţie de scara maşinii,

$$\begin{aligned} P &= f\,(r^2), \\ D &= f\,(r), \\ n &= f\left(\frac{1}{r}\right), \\ V &= f\,(r^3), \\ G &= f\,(r^2), \end{aligned} \tag{18}$$

se poate stabili următoarea ecuaţie adimensională:

$$\pi = (r^2)^a\,(r)^b\left(\frac{1}{r}\right)^c (r^3)^d\,(r^2)^e,$$

care dă legătura dintre exponenţi

$$2a + b - c + 3d + 2e = 0. \tag{19}$$

Luînd numai cîte doi termeni se pot realiza grupe de factori independente de scara seriei de maşini, figurate în tabloul nr. 4.

Evident că numai patru dintre aceste mărimi sînt independente, restul reducîndu-se una la alta.

Pentru definirea mărimilor obţinute s-a făcut apel la raportarea lor la o maşină ipotetică avînd pe rînd parametrii principali egali cu unitatea.

*) p. 32.

*Tabloul nr. 4*

**Cifrele caracteristice ale seriilor de maşini**

| Simbol | Formula | Denumire | Definiţie |
|---|---|---|---|
| $[P]_D$ | $PD^{-2}$ | încărcarea pistonului | puterea maşinii asemenea, avînd diametrul egal cu unitatea |
| $[D]_P$ | $PD^{-\frac{1}{2}}$ | | diametrul maşinii asemenea, avînd puterea egală cu unitatea |
| $[n]_D$ | $nD$ | | turaţia maşinii asemenea, avînd diametrul egal cu unitatea |
| $[D]_n$ | $Dn$ | | diametrul maşinii asemenea, avînd turaţia egală cu unitatea |
| $[n]_v$ | $nV^{\frac{1}{3}}$ | | turaţia maşinii asemenea, avînd volumul egal cu unitatea |
| $[V]_n$ | $Vn^3$ | | volumul maşinii asemenea, avînd turaţia egală cu unitatea |
| $[V]_G$ | $VG^{-\frac{3}{2}}$ | | volumul maşinii asemenea, avînd greutatea egală cu unitatea |
| $[G]_v$ | $GV^{-\frac{2}{3}}$ | | greutatea maşinii asemenea, avînd volumul egal cu unitatea |
| $[G]_P$ | $GP^{-1}$ | greutatea specifică | greutatea maşinii asemenea, avînd puterea egală cu unitatea |
| $[P]_G$ | $PG^{-1}$ | | puterea maşinii asemenea, avînd greutatea egală cu unitatea |
| $[P]_n$ | $Pn^2$ | | puterea maşinii asemenea, avînd turaţia egală cu unitatea |
| $[n]_P$ | $nP^{\frac{1}{2}}$ | | turaţia maşinii asemenea, avînd puterea egală cu unitatea |
| $[D]_v$ | $DV^{-\frac{1}{3}}$ | | diametrul maşinii asemenea, avînd volumul egal cu unitatea |
| $[V]_D$ | $VD^{-3}$ | | volumul maşinii asemenea, avînd diametrul egal cu unitatea |
| $[n]_G$ | $nG^{\frac{1}{2}}$ | | turaţia maşinii asemenea, avînd greutatea egală cu unitatea |
| $[G]_n$ | $Gn^2$ | | greutatea maşinii asemenea, avînd turaţia egală cu unitatea |
| $[V]_P$ | $VP^{-\frac{3}{2}}$ | | volumul maşinii asemenea, avînd puterea egală cu unitatea |
| $[P]_V$ | $PV^{-\frac{2}{3}}$ | | puterea maşinii asemenea, avînd volumul egal cu unitatea |
| $[G]_D$ | $GD^{-2}$ | | greutatea maşinii asemenea, avînd diametrul egal cu unitatea |
| $[D]_G$ | $DG^{-\frac{1}{2}}$ | | diametrul maşinii asemenea, avînd greutatea egală cu unitatea |

Rămîne acum ca în cadrul unui studiu statistic complet să se precizeze modul cum variază în realitate, la motoarele aproximativ asemenea, cifrele caracteristice independente de scara maşinii prezentate în tabloul nr. 4.

★

Din expunerea făcută, rezultă că teorema « $\pi$ » se pretează la deducerea unor relaţii de similitudine în cadrul motoarelor termice.

Din studiul efectuat s-a desprins necesitatea de a pune în discuţie şi domeniul de utilizare al motorului, atunci cînd se trece la integrarea sa într-o clasă de maşini similare.

Socotim că pentru motoarele de tracţiune este importantă menţinerea greutăţii specifice a motorului cît mai redusă şi deci constantă, indiferent de mărimea motorului. Se creează astfel o nouă condiţie de similitudine, care vine în contradicţie cu relaţia de similitudine cunoscută,

$$G_s = kr$$

(vezi tabloul nr. 3).

Socotim că datele statistice arată clar, cel puţin în cadrul motoarelor studiate, că greutatea motorului variază cu pătratul scării maşinii.

Prin introducerea acestui mod de a considera variaţia greutăţii nu s-au afectat decît parametri legaţi direct de greutatea întregii maşini, în timp ce indicii de rezistenţă rămîn invariabili.

Prezenta lucrare propune să se ia în considerare similitudinea geometrică şi mecanică pentru motoare de greutate specifică constantă. Pe bază de motoare existente este necesar să se dezvolte cifrele caracteristice expuse în tabloul nr. 4, urmînd apoi să se stabilească care din aceste cifre este mai potrivit pentru aprecierea calitativă a motoarelor.

Se consideră că metoda de calcul prin similitudine prezentată în acest articol corespunde motoarelor de tracţiune, motoare la care greutatea specifică poate fi considerată constantă.

## К ИССЛЕДОВАНИЮ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПРИ ПОМОЩИ СООТВЕТСТВУЮЩИХ ХАРАКТЕРНЫХ ЦИФР

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

В настоящей работе статистически исследуются на основе данных полученных на 540 двигателях [11], [12] и [13] приблизительно аналогичные им двигатели внутреннего сгорания. Определяется ряд приблизительно схожих двигателей, имеющих одинаковое применение и конструктивные и механические параметры которых изменяются в пределах средних значений; выводятся статистические законы изменения главных параметров.

Выбираются пять главных параметров (мощность, диаметр цилиндра, число оборотов, объем цилиндра и вес двигателя) и посредством размерного анализа устанавливаются два безразмерных числа (4) и (5), а также уравнения, вытекающие из этого закона (7). На рис. 1 и 2 представлен, на основании материала, исследуемого авторами, закон (7).

Из уравнения (7) выводится качественный показатель двигателя (8), выраженный для геометрически схожих двигателей, в виде (10).

Качественный показатель представляет собою отношение между средней нагрузкой на цикл и весом двигателя (9) и является, следовательно, коэффициентом использования материала. На рис. 3—8 указываются значения качественного показателя (9) для различно используемых двигателей.

Из уравнения (7) можно вывести заключение, что для геометрически и механически схожих двигателей вес этих последних изменяется с квадратом шкалы пропорциональности машин (11). Это заключение совпадает с выводами О р л о в а [7]. Авторы предлагают исследовать для тяговых двигателей геометрическо-механическое подобие, при постоянном удельном весе. Цифры, характерные для этих двигателей, излагаются в таблице 4.

## ОБЪЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1. — Статистическая диаграмма зависимости отношения $\psi = \frac{s}{D}$ от произведения $w_m G_s$.

Рис. 2. — Диаграмма $\psi$ в зависимости от $w_m G_s$ в нормальных прямоугольных координатах.

Рис. 3. — Диаграмма $\psi$ в зависимости от $w_m G_s$ для двигателей легковых автомобилей (фактор $\sigma'$ параметр).

○ $p_m = 5 - 6 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$; ● $p_m = 6 - 7 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$.

Рис. 4. — Диаграмма $\psi$ в зависимости от $w_m G_s$ для двигателей грузовиков (фактор $\sigma'$ параметр).

⌀ $p_m = 4 - 5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$; ○ $p_m = 5 - 6 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$; ● $p_m = 6 - 7 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$;

□ $p_m = 7 - 8 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$.

Рис. 5. — Диаграмма $\psi$ в зависимости от $w_m G_s$ для двигателей автобусов (фактор $\sigma'$ параметр).

⌀ $p_m = 4 - 5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$; ○ $p_m = 5 - 6 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$;

● $p_m = 6 - 7 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$; □ $p_m = 7 - 8 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$.

Рис. 6. — Диаграмма $\psi$ в зависимости от $w_m G_s$ для тракторных двигателей (фактор $\sigma'$ параметр).

⌀ $p_m = 4 - 5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$; ○ $p_m = 5 - 6 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$; ● $p_m = 6 - 7 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$.

Рис. 7. — Диаграмма $\psi$ в зависимости от $w_m G_s$ для двигателей промышленного типа (фактор $\sigma'$ параметр).

⌀ $p_m = 4 - 5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$; ○ $p_m = 5 - 6 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$; ● $p_m = 6 - 7 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$;

□ $p_m = 7 - 8 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$; ⊙ $p_m = 8 - 9 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$.

Рис. 8. — Диаграмма $\psi$ в зависимости от $w_m G_s$ для двигателей корабельного типа (фактор $\sigma'$ параметр).

$\varnothing$ $p_m = 4 - 5 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ; ○ $p_m = 5 - 6 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ; ● $p_m = 6 - 7 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ;

□ $p_m = 7 - 8 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ ; ⊙ $p_m = 8 - 9 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$ .

Рис. 9 *a)* и *b)* — Веса двигателей различного назначения.

Рис. 10 *a)* и *b)*. — Веса двигателей одинакового назначения и с одинаковым отношением между пробегом и диаметром.

Рис. 11. — Конструктивный вес двигателей самолетов без компрессора.
○ звездообразный двигатель с 5 цилиндрами и воздушным охлаждением;
$\varnothing$ рядный двигатель с 4 цилиндрами и воздушным охлаждением;
● рядный двигатель с 6 цилиндрами и воздушным охлаждением.

Рис. 12. — Удельный вес двигателей в зависимости от мощности:
● легковых автомобилей; $\varnothing$ корабельных; ○ грузовиков; □ промышленных; ⊙ тракторных; —○— автобусов.

## CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DES MOTEURS À COMBUSTION INTERNE AU MOYEN DES CHIFFRES CARACTÉRISTIQUES

(RÉSUMÉ)

Dans le travail présenté, on étudie statistiquement, au moyen de 540 moteurs [11], [12] et [13], des séries de moteurs à combustion interne, approximativement similaires. On définit, comme série de moteurs approximativement similaires, les moteurs ayant le même emploi et dont les paramètres constructifs et mécaniques varient autour d'une valeur moyenne; on en déduit des lois statistiques en ce qui concerne la variation des paramètres principaux.

On choisit cinq paramètres principaux (puissance, diamètre du cylindre, nombre de tours par minute, cylindrée et poids du moteur) et, par analyse dimensionnelle, on établit deux nombres adimensionnels (4) et (5) ainsi que l'équation résultant de cette loi (7). Les figures 1 et 2 interprètent la loi (7), en se basant sur le matériel étudié par les Auteurs.

L'équation (7) permet d'en déduire le chiffre de qualité du moteur (8) qui, pour des moteurs géométriquement similaires, s'écrit sous la forme (10). Le chiffre de qualité est le rapport de la force moyenne travaillant pendant un cycle au poids du moteur (9) et représente, par conséquent, un chiffre d'utilisation du matériel. Les figures 3—8 donnent la valeur du chiffre de qualité (9), correspondant à des moteurs ayant divers emplois.

En se basant sur l'équation (7) on peut en déduire que, pour les moteurs géométriquement et mécaniquement similaires, le poids varie comme le carré de l'échelle de proportionnalité des machines (11). Cette observation confirme la constatation d'Orlov [7]. Les Auteurs se proposent d'étudier, pour les moteurs de traction, la similitude géométro-mécanique à poids spécifique constant. Les chiffres caractéristiques de ces moteurs sont indiqués dans le tableau 4.

## EXPLICATION DES FIGURES

Fig. 1. — Diagramme statistique de la dépendance du rapport $\psi = \frac{s}{D}$ du produit $w_m G_s$.

Fig. 2. — Diagramme $\psi$ fonction de $w_m G_s$ dans les coordonnées rectangulaires normales.

Fig. 3. — Diagramme $\psi$ fonction de $w_m G_s$ pour les moteurs de voitures automobiles (facteur $\sigma'$ = paramètre).

$$\bigcirc\ p_m = 5-6\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\ ;\quad \bullet\ p_m = 6-7\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\ .$$

Fig. 4. — Diagramme $\psi$ fonction de $w_m G_s$ pour les moteurs de camion automobile (facteur $\sigma'$ = paramètre).

$$\varnothing\ p_m = 4-5\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\ ;\quad \bigcirc\ p_m = 5-6\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2};\quad \bullet\ p_m = 6-7\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2};\quad \square\ p_m = 7-8\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\ .$$

Fig. 5. — Diagramme $\psi$ fonction de $w_m G_s$ pour les moteurs d'autobus (facteur $\sigma'$ = paramètre).

$$\varnothing\ p_m = 4-5\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\ ;\quad \bigcirc\ p_m = 5-6\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2};\quad \bullet\ p_m = 6-7\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2};\quad \square\ p_m = 7-8\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\ .$$

Fig. 6. — Diagramme $\psi$ fonction de $w_m G_s$ pour les moteurs de tracteurs (facteur $\sigma'$ = paramètre).

$$\varnothing\ p_m = 4-5\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\ ;\quad \bigcirc\ p_m = 5-6\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\ ;\quad \bullet\ p_m = 6-7\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\ .$$

Fig. 7. — Diagramme $\psi$ fonction de $w_m G_s$ pour les moteurs du type industriel (facteur $\sigma'$ = paramètre).

$$\varnothing\ p_m = 4-5\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\ ;\quad \bigcirc\ p_m = 5-6\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2};\quad \bullet\ p_m = 6-7\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2};\quad \square\ p_m = 7-8\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2};$$

$$\odot\ p_m = 8-9\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\ .$$

Fig. 8. — Diagramme $\psi$ fonction de $w_m G_s$ pour les moteurs du type marin (facteur $\sigma'$ = paramètre).

$$\varnothing\ p_m = 4-5\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\ ;\quad \bigcirc\ p_m = 5-6\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2};\quad \bullet\ p_m = 6-7\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2};\quad \square\ p_m = 7-8\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2};$$

$$\odot\ p_m = 8-9\ \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}\ .$$

Fig. 9. — *a)* et *b)* Poids des moteurs d'utilisation différente.

Fig. 10. — *a)* et *b)* Poids des moteurs dont l'utilisation et le rapport entre la course et le diamètre sont les mêmes.

Fig. 11. — Poids constructif des moteurs d'avion sans compresseur. ○ = moteur en étoile, 5 cylindres, refroidissement à air; ⌀ = moteur à 4 cylindres en ligne, refroidissement à air; ● = moteur à 6 cylindres en ligne, refroidissement à air.

Fig. 12. — Poids spécifique des moteurs en fonction de la puissance: ● = voiture automobile; ⌀ = moteur marin; ○ = camion automobile; □ = moteur industriel; ⊙ = = tracteur; —○— = autobus.

## BIBLIOGRAFIE


1. Pierre Destival, *L'effet d'échelle dans les moteurs et la turbine.* J. SIA, 1952, nr. 2, p. 31.
2. E. Ehmsen, *Kennwerte für Brennkraftmaschinen.* MTZ, 1942, nr. 1, p. 2.
3. E. Iurzolla, *Sull'impiego dei numeri caratteristici nello studio dei moderni motori aeronautici.* L'Aerotecnica, 1951, nr. 6, p. 348.
4. K. Sanden, *Kennzahlen für Schnelläufigkeit und Leistungsgewicht von Brennkraftmaschinen.* Ing. Archiev, t. III, p. 283.
5. K. Sanden u. E. Ehmsen, *Kennwerte für Brennkraftmaschinen.* MTZ, 1943, nr. 10, p. 361.
6. V. T. Ţvetkov, *Motoare cu ardere internă.* Ed. tehnică, Bucureşti, 1954.
7. P. I. Orlov, *Konstrucţii aviaţionnîh dvigatelei.* Oboronghiz, Moscova, 1940.
8. *** *Motoarele uşoare sovietice.* I. *Dezvoltarea construcţiei de motoare uşoare în U.R.S.S.* Studii şi cercetări de energetică, t. II, nr. 1—4, ianuarie-decembrie 1952, p. 131.
9. R. Mărdărescu, *Mărimile specifice ale motoarelor cu ardere internă.* Metalurgia şi construcţia de maşini, 1955, nr. 4—5, p. 43.
10. — *Invariantul caracteristic al motoarelor cu ardere internă.* Metalurgia şi construcţia de maşini, 1955, nr. 11, p. 3.
11. *** Automotive Industries, 1 martie 1940.
12. *** Automotive Industries, 15 martie 1951.
13. E. A. Ciudakov i E. Malahovski, *Atlas construkţii sovieţkih avtomobilei.* Masghiz, Moscova, 1950.

STUDII ȘI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 1—2, 1956

*COMBUSTIBILI SOLIZI*

# STUDIUL CHIMIC ȘI TEHNOLOGIC AL TURBELOR DIN R.P.R.

## NOTA I

## STUDIUL CARACTERISTICILOR CHIMICO-TEHNICE ȘI AL GRADULUI DE TURBIFICARE*)

DE

I. BLUM, FR. BOLCHI, I. EPURE, C. GHEORGHIȚĂ, M. GOLDȘTEIN, M. GORUNEANU, N. IONESCU, H. MANDEL, TH. PIATKOWSKI și N. SÎRBU

Pentru rezolvarea problemei *Studiul chimico-tehnic și tehnologic al turbelor din R.P.R.*, s-a urmărit ca primă temă *Studiul științific privind stabilirea însușirilor turbelor din țară*, după care s-a trecut — avînd în vedere și rezervele cu răspîndirea lor — la determinarea posibilităților de prelucrare și utilizare chimico-tehnologică și energetică a acestor turbe.

Ținînd seama de faptul că la noi în țară se exploatează doar 4 bazine și anume: bazinele Dornei, Ciuc, Făgăraș și Călățele-Huedin, cuprinzînd respectiv zăcămintele: Poiana Stampei și Dersca-Dorohoi, Miercurea-Ciuc, Mîndra-Făgăraș și Călățele-Huedin, ne-am ocupat în special de acestea.

Pentru realizarea primei teme, s-au prelevat probe din toate cele 5 zăcăminte, în cuprinsul cărora se află și exploatările de turbă.

S-a studiat în primul rînd aspectul macroscopic prezentat de fiecare zăcămînt în parte (formă, structură, culoare, consistență, grad de sfărîmare etc.). Acesta s-a dovedit diferit după locuri, ceea ce indică și o neuniformitate în compoziția turbei.

Ca urmare a indicațiilor obținute pe cale macroscopică, am putea trage concluzia că în scara de turbificare a zăcămintelor de turbă, cea mai tînără se prezintă turba de la Călățele-Huedin, după care urmează Poiana Stampei; mai îmbătrînite ar părea turbele de la Mîndra-Făgăraș și Miercurea-Ciuc.

*) Lucrarea a fost executată în Institutul de energetică al Academiei R.P.R., secția tehnologia combustibililor solizi.

S-a trecut apoi la studiul de laborator, care a fost extins asupra a 20 de probe de la exploatările de turbă, repartizate pe zăcăminte, după cum urmează:

1. Poiana Stampei ..... 5 probe
2. Călăţele-Huedin*) ..... 3 „
3. Mîndra-Făgăraş ..... 4 „
4. Miercurea-Ciuc..... 4 „
5. Dersca-Dorohoi ..... 4 „

Probele au fost luate din cîteva puncte (locuri) caracteristice şantierului de turbă, atît la suprafaţă cît şi din adîncime şi trimise laboratorului în butoaie de tablă închise.

**Pregătirea materialului pentru efectuarea analizelor**

S-au făcut probe medii conform STAS din toate cele 20 de butoaie. Proba aceasta a fost uscată la greutate constantă (determinarea umidităţii de zăcămînt) măcinată, mojarată şi sitată, pentru a aduce întreaga cantitate necesară lucrărilor la granulaţia 0—0,2 mm.

Materialul astfel pregătit a fost închis în borcane cu dop rodat, pentru a-l feri de eventualele variaţii de umiditate ale mediului înconjurător (turba fiind un material foarte hidrofil) şi supus apoi analizelor **).

Rezultatele analizelor efectuate asupra acestor probe sînt concretizate în tablourile nr. 1—21, repartizate pe zăcăminte ***).

Astfel s-au stabilit: 1) caracteristicile chimico-tehnice ($\%U_h$, % cenuşă, % materii volatile etc.), 2) compoziţia elementară, 3) stadiul de turbificare, 4) temperatura de aprindere a turbelor, precum şi 5) compoziţia cenuşelor de turbă şi caracteristicilor lor de fuziune.

*Tabloul nr. 1*

**Caracteristicile chimico-tehnice ale turbelor de Poiana Stampei**

| | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | rap. brut % | rap. m. c. % | rap. brut % | rap. m. c. % | rap. brut % | rap. m. c. % | rap. brut % | rap. m. c. % | rap. brut % | rap. m. c. % |
| Umiditate . . . | 12,06 | — | 10,62 | — | 9,97 | — | 10,51 | — | 10,00 | — |
| Cenuşă . . . . . | 7,82 | — | 2,12 | — | 2,50 | — | 3,36 | — | 3,25 | — |
| Cocs brut . . . | 33,42 | — | 28,78 | — | 29,56 | — | 27,46 | — | 28,36 | — |
| Cocs net . . . . | 25,60 | 31,96 | 26,66 | 30,55 | 27,06 | 30,91 | 24,10 | 27,98 | 25,11 | 28,95 |
| Mat. volatile . . | 54,52 | 68,04 | 60,60 | 69,45 | 60,47 | 69,09 | 62,03 | 72,02 | 61,64 | 71,05 |
| Sulf total . . . | 0,19 | — | 0,19 | — | 0,19 | — | 0,32 | — | 0,15 | — |
| $P_s$ kcal/kg . . . | 4 475 | 5 585 | 4 913 | 5 630 | 4 659 | 5 323 | 4455 | 5 173 | 4 657 | 5 352 |
| $P_i^s$ kcal/kg . . | 4 131 | 5 246 | 4 550 | 5 207 | 4 306 | 4 988 | 4105 | 4 839 | 4 304 | 5 015 |

*) Proba 1 din zăcămîntul Călăţele-Huedin, căreia i s-a făcut numai analiza tehnică şi elementară, a fost luată doar pentru comparaţie, ea nefiind reprezentativă pentru zăcămînt (cantitate redusă) şi în consecinţă, după stabilirea acestor date analitice, s-a lucrat mai departe numai asupra celorlalte.

**) Analizele tehnice au fost efectuate conform STAS 398/51, iar compoziţia elementară s-a determinat conform STAS 2905/51.

***) Rezultatele obţinute pentru turba brută au fost raportate şi la masa combustibilă, pentru a putea face posibilă compararea şi deci interpretarea lor. Cifrele arabe capăt de coloană (1, 2, 3, 4, 5) se referă la proba respectivă de la fiecare şantier de turbă.

*Tabloul nr. 2*

**Compoziţia elementară a turbelor de Poiana Stampei**

| | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | rap. brut % | rap. m. c. % | rap. brut % | rap. m. c. % | rap. brut % | rap. m. c. % | rap. brut % | rap. m. c. % | rap. brut % | rap. m. c. % |
| Carbon | 47,58 | 59,38 | 52,54 | 60,21 | 50,43 | 57,61 | 48,05 | 55,79 | 50,24 | 57,91 |
| Hidrogen | 5,03 | 6,28 | 5,55 | 6,36 | 5,44 | 6,21 | 5,32 | 6,18 | 5,42 | 6,25 |
| Sulf comb. | 0,08 | 0,10 | 0,08 | 0,09 | 0,12 | 0,14 | 0,22 | 0,25 | 0,08 | 0,09 |
| Azot | 1,14 | 1,42 | 0,81 | 0,93 | 1,08 | 1,23 | 0,71 | 0,82 | 0,98 | 1,13 |
| Oxigen | 26,29 | 32,82 | 28,28 | 32,41 | 30,46 | 34,81 | 31,83 | 36,96 | 30,03 | 34,62 |
| Umiditate | 12,06 | — | 10,62 | — | 9,97 | — | 10,51 | — | 10,00 | — |
| Cenuşă | 7,82 | — | 2,12 | — | 2,50 | — | 3,36 | — | 3,25 | — |

*Tabloul nr. 3*

**Datele analitice asupra cenuşelor de turbă Poiana Stampei**

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| | % | % | % | % | % |
| $SiO_2$ | 43,22 | 24,23 | 18,20 | 33,92 | 39,19 |
| $Fe_2O_3$ | 21,39 | 32,26 | 51,55 | 35,94 | 28,71 |
| $Al_2O_3$ | 22,82 | 29,19 | 7,95 | 5,62 | 7,79 |
| $P_2O_5$ | 1,63 | 4,09 | 3,39 | 2,90 | 2,55 |
| $TiO_2$ | 0,48 | 0,44 | 0,43 | 0,50 | 0,70 |
| CaO | 6,68 | 10,75 | 11,75 | 7,17 | 9,59 |
| MgO | 1,72 | 3,38 | 2,35 | 1,99 | 2,43 |
| $Mn_2O_3$ | 0,27 | 0,70 | 0,43 | 0,40 | 0,50 |
| $SO_3$ | 3,43 | 12,43 | 6,83 | 7,20 | 5,27 |
| $Na_2O$ | 9,24 | 8,54 | 8,60 | 7,65 | 6,14 |
| $K_2O$ | 1,79 | 0,72 | 0,54 | 0,70 | 3,11 |

*Tabloul nr. 4*

**Punctul de înmuiere, topire şi curgere a cenuşelor de Poiana Stampei**

| Cenuşa de: | Punctul de | | |
|---|---|---|---|
| | înmuiere °C | topire °C | curgere °C |
| Poiana Stampei 1 | 1 080 | 1 155 | 1 190 |
| „ „ 2 | 885 | 1 080 | 1 105 |
| „ „ 3 | 970 | 1 045 | 1 120 |
| „ „ 4 | 950 | 1 010 | 1 030 |
| „ „ 5 | 930 | 1 040 | 1 070 |

Temperatura de aprindere a turbelor de Poiana Stampei a fost determinată cu aparatul Feddeler avînd factori constanţi: cantitatea de turbă = 1 g turbă pastilată, debitul de oxigen = 0,25 l/min, intensitatea curentului de 120 V/3A; s-a obţinut pentru

Poiana Stampei 1 239 °C
„ „ 2 238 „
„ „ 3 231 „
„ „ 4 232 „
„ „ 5 229 „

*Tabloul nr. 5*

**Caracteristicile chimico-tehnice ale turbelor de Călăţele-Huedin**

| | 1 | | 2 | | 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | rap. la brut % | rap. la m.c. % | rap. la brut % | rap. la m.c. % | rap. la brut % | rap. la m.c. % |
| Umiditate | 10,47 | — | 8,94 | — | 13,15 | — |
| Cenuşă | 2,79 | — | 34,54 | — | 3,14 | — |
| Cocs brut | 26,08 | — | 53,98 | — | 29,70 | — |
| Cocs net | 23,29 | 26,85 | 19,44 | 34,39 | 26,56 | 31,73 |
| Mat. volatile | 63,45 | 73,15 | 37,08 | 65,61 | 57,15 | 68,27 |
| Sulf total | 0,23 | — | 0,49 | — | 0,25 | — |
| $P_s$ kcal/kg | 4 315 | 4 975 | 3 162 | 5 595 | 4 332 | 5 171 |
| $P_i$ „ | 3 975 | 4 655 | 2 915 | 5 253 | 3 976 | 4 840 |

*Tabloul nr. 6*

**Compoziţia elementară a turbelor de Călăţele-Huedin**

| | 1 | | 2 | | 3 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | rap. la brut % | rap. la m.c. % | rap. la brut % | rap la m.c. % | rap. la brut % | rap. la m.c. % |
| Carbon | 45,77 | 52,76 | 33,68 | 59,58 | 46,55 | 55,61 |
| Hidrogen | 5,14 | 5,92 | 3,58 | 6,33 | 5,14 | 6,14 |
| Sulf. comb. | 0,03 | 0,03 | 0,29 | 0,51 | 0,05 | 0,06 |
| Azot | 1,79 | 2,06 | 1,38 | 2,44 | 1,53 | 1,83 |
| Oxigen | 34,02 | 39,23 | 17,59 | 31,14 | 30,44 | 36,36 |
| Umiditate | 10,47 | — | 8,94 | — | 13,15 | — |
| Cenuşă | 2,79 | — | 34,54 | — | 3,14 | — |

*Tabloul nr. 7*

**Date analitice asupra cenuşelor de turbă de Călăţele-Huedin**

| | 2 | 3 |
|---|---|---|
| | % | % |
| $SiO_2$ | 45,94 | 42,60 |
| $Fe_2O_3$ | 17,64 | 17,38 |
| $Al_2O_3$ | 24,13 | 23,97 |
| $P_2O_5$ | 0,17 | 0,24 |
| $TiO_2$ | 0,67 | 0,69 |
| $CaO$ | 7,76 | 5,90 |
| $MgO$ | 1,95 | 2,69 |
| $Mn_2O_3$ | 0,26 | 0,76 |
| $SO_3$ | 4,83 | 6,91 |
| $Na_2O$ | 6,35 | 2,61 |
| $K_2O$ | 4,07 | 4,59 |

*Tabloul nr. 8*

**Puncte de înmuiere, topire şi curgere a cenuşelor de Călăţele-Huedin**

| Cenuşa de: | Punctul de | | |
|---|---|---|---|
| | înmuiere °C | topire °C | curgere °C |
| Călăţele-Huedin 2 | 970 | 1 130 | 1 175 |
| „ 3 | 890 | 1 080 | 1 145 |

Temperatura de aprindere a turbelor de Călăţele-Huedin a fost determinată cu aparatul Feddeler, avînd factori constanţi: cantitatea de turbă = 1 g, turba pastilată, debitul de oxigen = 0,25 l/min, intensitatea curentului 120 V/3A; s-a obţinut pentru

Călăţele-Huedin 2 230 °C
„ „ 3 234 „

*Tabloul nr. 9*

**Caracteristice chimico-tehnice ale turbelor de Mîndra-Făgăraş**

| | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | rap. brut % | rap. m.c. % | rap. brut % | rap. m.c. % | rap. brut % | rap. m.c. % | rap. brut % | rap. m.c. % |
| Umiditate | 10,54 | — | 11,05 | — | 10,51 | — | 8,85 | — |
| Cenuşă | 16,20 | — | 12,83 | — | 18,15 | — | 42,70 | — |
| Cocs brut | 39,90 | — | 40,72 | — | 40,86 | — | 60,48 | — |
| Cocs net | 23,70 | 32,70 | 27,89 | 36,64 | 22,72 | 31,85 | 17,78 | 36,70 |
| Mat. volatile | 49,56 | 67,65 | 48,23 | 63,36 | 48,62 | 68,15 | 30,67 | 63,30 |
| Sulf total | 0,34 | — | 1,24 | — | 0,26 | — | 2,20 | — |
| $P_s$ kcal/kg | 3 901 | 5 323 | 4 307 | 5 658 | 4 158 | 5 828 | 2 723 | 5 282 |
| $P_i$ „ | 3 601 | 5 002 | 4 010 | 5 305 | 3 842 | 5 473 | 2 524 | 4 949 |

*Tabloul nr. 10*

**Compoziţia elementară a turbelor de Mîndra-Făgăraş**

| | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | rap. brut % | rap. m.c. % | rap. brut % | rap. m.c. % | rap. brut % | rap. m.c. % | rap. brut % | rap. m.c. % |
| Carbon | 42,20 | 57,60 | 46,06 | 60,51 | 43,61 | 61,13 | 28,86 | 59,56 |
| Hidrogen | 4,38 | 5,98 | 4,28 | 5,62 | 4,69 | 6,57 | 2,71 | 5,59 |
| Sulf. comb. | 0,14 | 0,19 | 1,04 | 1,37 | 0,06 | 0,08 | 2,00 | 4,13 |
| Azot | 0,99 | 1,35 | 2,08 | 2,73 | 2,07 | 2,90 | 0,72 | 1,48 |
| Oxigen | 25,55 | 34,88 | 22,66 | 29,77 | 20,91 | 29,32 | 13,96 | 29,24 |
| Umiditate | 10,54 | — | 11,05 | — | 10,51 | — | 8,85 | — |
| Cenuşă | 16,20 | — | 12,83 | — | 18,15 | — | 42,70 | — |

*Tabloul nr. 11*

**Date analitice asupra cenuşelor de turbă de Mîndra-Făgăraş**

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| | % | % | % | % |
| $SiO_2$ | 53,87 | 35,32 | 53,99 | 56,01 |
| $Fe_2O_3$ | 13,03 | 13,51 | 12,98 | 20,04 |
| $Al_2O_3$ | 13,61 | 0,44 | 15,98 | 10,06 |
| $P_2O_5$ | — | 0,35 | 0,43 | 0,08 |
| $TiO_2$ | — | 0,32 | 0,46 | 0,63 |
| CaO | 12,75 | 18,08 | 10,29 | 11,72 |
| MgO | 3,58 | 5,06 | 4,34 | 3,27 |
| $Mn_2O_3$ | 0,21 | 0,08 | 0,16 | 0,11 |
| $SO_3$ | 2,17 | 15,80 | 2,45 | 4,98 |
| $Na_2O$ | 12,47 | 0,20 | 0,50 | 5,46 |
| $K_2O$ | 0,58 | 2,55 | 1,70 | 4,81 |

*Tabloul nr. 12*

**Punctul de înmuiere, topire şi curgere a cenuşelor de Mîndra-Făgăraş**

| Cenuşa de: | Punctul de: | | |
|---|---|---|---|
| | înmuiere °C | topire °C | curgere °C |
| Mîndra-Făgăraş 1 | 990 | 1 080 | 1 105 |
| „ „ 2 | 1 040 | 1 125 | 1 145 |
| „ „ 3 | 995 | 1 110 | 1 165 |
| „ „ 4 | 940 | 1 030 | 1 060 |

Temperatura de aprindere a turbelor Mîndra-Făgăraş a fost determinată cu aparatul Feddeler, avînd factori constanţi: cantitatea de turbă = 1 g, turba pastilată, debitul de oxigen = 25 l/min, intensitatea curentului de 120 V/3A; s-a obţinut pentru

| | | |
|---|---|---|
| Mîndra-Făgăraş | 1 | 235 °C |
| „ „ | 2 | 216 „ |
| „ „ | 3 | 223 „ |
| „ „ | 4 | 219 „ |

*Tabloul nr. 13*

**Caracteristicile chimico-tehnice ale turbelor de Miercurea-Ciuc**

| | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | rap. brut % | rap. m.c. % | rap. brut % | rap. m.c. % | rap. brut % | rap. m.c. % | rap. brut % | rap. m.c. % |
| Umiditate | 13,00 | — | 13,43 | — | 14,72 | — | 15,66 | — |
| Cenuşă | 9,82 | — | 8,27 | — | 9,38 | — | 8,35 | — |
| Cocs brut | 34,84 | — | 33,93 | — | 35,56 | — | 34,66 | — |
| Cocs net | 25,02 | 32,41 | 25,66 | 32,77 | 26,18 | 34,49 | 26,31 | 34,62 |
| Mat. volatile | 52,16 | 67,59 | 52,64 | 67,23 | 49,72 | 65,51 | 49,68 | 65,38 |
| Sulf total | 0,37 | — | 0,48 | — | 1,05 | — | 0,50 | — |
| $P_s$ kcal/kg | 4 097 | 5 309 | 4 242 | 5 518 | 4 283 | 5 643 | 4 177 | 3 407 |
| $P_i$ „ | 3 787 | 5 008 | 3 972 | 5 112 | 3 895 | 5 322 | 3 846 | 5 185 |

*Tabloul nr. 14*

**Compoziţia elementară a turbelor de Miercurea-Ciuc**

| | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | rap. brut % | rap. m.c. % | rap. brut % | rap. m.c. % | rap. brut % | rap. m.c. % | rap. brut % | rap. m.c. % |
| Carbon | 44,36 | 57,47 | 45,96 | 58,69 | 45,76 | 60,29 | 44,67 | 58,78 |
| Hidrogen | 4,30 | 5,57 | 4,43 | 5,66 | 4,52 | 5,95 | 4,39 | 5,78 |
| Sulf comb. | 0,17 | 0,22 | 0,28 | 0,36 | 0,85 | 1,12 | 0,30 | 0,39 |
| Azot | 2,00 | 2,59 | 1,58 | 2,02 | 1,41 | 1,86 | 1,01 | 1,33 |
| Oxigen | 26,35 | 34,15 | 26,05 | 33,27 | 23,36 | 30,78 | 25,62 | 33,72 |
| Umiditate | 13,00 | — | 13,43 | — | 14,72 | — | 15,66 | — |
| Cenuşă | 9,82 | — | 8,27 | — | 9,36 | — | 8,35 | — |

*Tabloul nr. 15*

**Date analitice asupra cenuşelor de turbă de Miercurea-Ciuc**

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| | % | % | % | % |
| $SiO_2$ | 16,62 | 15,84 | 5,43 | 7,41 |
| $Fe_2O_3$ | 18,65 | 17,35 | 19,00 | 23,88 |
| $Al_2O_3$ | 4,32 | 6,09 | 0,76 | 0,75 |
| $P_2O_5$ | 1,57 | 1,46 | 1,46 | 1,48 |
| $TiO_2$ | 0,26 | 0,16 | 0,10 | 0,11 |
| CaO | 43,25 | 47,20 | 38,08 | 42,57 |
| MgO | 2,29 | 4,54 | 2,38 | 2,20 |
| $Mn_2O_3$ | 0,17 | 0,18 | 0,11 | 0,14 |
| $SO_3$ | 10,68 | 12,43 | 13,50 | 17,48 |
| $Na_2O$ | 0,43 | 0,44 | 2,42 | 0,71 |
| $K_2O$ | 1,26 | 0,74 | 2,43 | 2,68 |

*Tabloul nr. 16*

**Punctul de înmuiere, topire şi curgere a cenuşelor de Miercurea-Ciuc**

| Cenuşa de: | Punctul de: | | |
|---|---|---|---|
| | înmuiere °C | topire °C | curgere °C |
| Miercurea-Ciuc 1 | 955 | 1 450 | 1 500 |
| ,, ,, 2 | 985 | 1 500 | 1 500 |
| ,, ,, 3 | 955 | 1 400 | 1 400 |
| ,, ,, 4 | 955 | 1 400 | 1 400 |

Temperatura de aprindere a turbelor de Miercurea-Ciuc a fost determinată cu aparatul Feddeler, avînd factori constanţi: cantitatea de turbă = 1 g, turba pastilată, debitul de oxigen 0,25 l/min, intensitatea curentului de 120 V/3A; s-a obţinut pentru

Miercurea-Ciuc 1 213 °C
,, ,, 2 215 ,,
,, ,, 3 205 ,,
,, ,, 4 230 ,,

*Tabloul nr. 17*

**Caracteristicile chimico-tehnice ale turbelor de Dersca-Dorohoi**

| | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | rap. brut % | rap. m.c. % | rap. brut % | rap. m.c. % | rap. brut % | rap. m.c. % | rap. brut % | rap. m.c. % |
| Umiditate | 11,94 | — | 13,92 | — | 9,97 | — | 11,58 | — |
| Cenuşă | 12,91 | — | 13,00 | — | 29,19 | — | 21,17 | — |
| Cocs brut | 35,84 | — | 28,18 | — | 18,57 | — | 48,45 | — |
| Cocs net | 22,93 | 30,51 | 25,18 | 34,45 | 47,76 | 30,52 | 27,28 | 40,56 |
| Mat. volatile | 52,22 | 69,49 | 47,90 | 65,55 | 42,27 | 69,48 | 39,97 | 59,44 |
| Sulf total | 0,81 | — | 3,77 | — | 0,62 | — | 3,64 | — |
| $P_s$ kcal/kg | 3 992 | 5 312 | 3 943 | 5 395 | 3 092 | 5 093 | 3 296 | 4 901 |
| $P_i$ „ | 3 683 | 4 997 | 3 632 | 5 084 | 2 842 | 4 777 | 3 027 | 4 625 |

*Tabloul nr. 18*

**Compoziţia elementară a turbelor de Dersca-Dorohoi**

| | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | rap. brut % | rap. m.c. % | rap. brut % | rap. m.c. % | rap. brut % | rap. m.c. % | rap. brut % | rap. m.c. % |
| Carbon | 4,28 | 57,05 | 41,78 | 57,77 | 32,88 | 54,04 | 35,15 | 52,27 |
| Hidrogen | 4,39 | 5,84 | 4,21 | 5,76 | 3,44 | 5,66 | 3,70 | 5,50 |
| Sulf comb. | 0,50 | 0,66 | 3,33 | 4,58 | 0,06 | 0,10 | 3,44 | 5,11 |
| Azot | 1,70 | 2,26 | 1,42 | 1,94 | 1,23 | 2,02 | 1,75 | 2,60 |
| Oxigen | 25,68 | 34,19 | 22,34 | 30,57 | 23,23 | 38,18 | 23,21 | 34,52 |
| Umiditate | 11,94 | — | 13,92 | — | 9,97 | — | 11,58 | — |
| Cenuşă | 12,91 | — | 13,00 | — | 29,19 | — | 21,17 | — |

*Tabloul nr. 19*

**Date analitice asupra cenuşelor de turbă de Dersca-Dorohoi**

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| | % | % | % | % |
| $SiO_2$ | 33,80 | 15,43 | 14,79 | 15,60 |
| $Fe_2O_3$ | 14,52 | 8,64 | 11,77 | 11,04 |
| $Al_2O_3$ | 12,14 | 4,14 | 4,09 | 0,32 |
| $P_2O_5$ | 1,06 | 0,86 | 1,00 | 0,70 |
| $TiO_2$ | 0,39 | 0,13 | 0,17 | 0,16 |
| $CaO$ | 36,52 | 36,13 | 57,70 | 55,50 |
| $MgO$ | 3,26 | 2,67 | 3,10 | 3,86 |
| $Mn_2O_3$ | 0,43 | 0,51 | 0,57 | 0,64 |
| $SO_3$ | 5,95 | 8,53 | 4,83 | 2,33 |
| $Na_2O$ | 11,01 | 8,00 | 9,05 | 7,37 |
| $K_2O$ | 0,53 | 0,36 | 1,00 | 0,38 |

*Tabloul nr. 20*

**Punctul de înmuiere, topire şi curgere a cenuşelor de Dersca-Dorohoi**

| Cenuşa de: | Punctul de: | | |
|---|---|---|---|
| | înmuiere °C | topire °C | curgere °C |
| Dersca-Dorohoi 1 | 1 030 | 1 130 | 1 150 |
| ,, ,, 2 | 885 | 1 400 | 1 400 |
| ,, ,, 3 | 920 | 1 400 | 1 400 |
| ,, ,, 4 | 900 | 1 400 | 1 400 |

Temperatura de aprindere a turbelor de Dersca-Dorohoi a fost determinată cu aparatul Feddeler avînd factori constanţi: cantitatea de turbă = 1 g, turba pastilată, debitul de oxigen = 25 l/min, intensitatea curentului de 120 V/3A; s-a obţinut pentru

| | | |
|---|---|---|
| Dersca-Dorohoi | 1 | 223 °C |
| ,, ,, | 2 | 229 ,, |
| ,, ,, | 3 | 215 ,, |
| ,, ,, | 4 | 220 ,, |

**Consideraţii asupra datelor chimico-tehnice analitice ale turbelor**

Ca urmare a studiului comparativ al acestor rezultate s-au făcut următoarele constatări:

*Procentul de umiditate higroscopică* $U_h$ la care s-a ajuns prin uscarea în laborator a probelor de turbă, variază în limite strînse între 9—13%; excepţie fac doar două probe din Miercurea-Ciuc, cu 14,7 şi 15,7%.

Avînd în vedere că nici acestea nu sînt prea depărtate de valorile tuturor celorlalte, se poate trage concluzia că, uscarea turbelor noastre se poate realiza în condiţii de temperatură medie (laborator) pînă la o valoare destul de scăzută; lucru foarte avantajos în special pentru uşurarea operaţiilor anterioare brichetării.

*Procentul de cenuşă*, în schimb, variază foarte mult, nu numai de la un zăcămînt la altul, dar şi de la un loc (carieră, teren) la altul, iar în adîncime el variază pe strate.

Astfel, la zăcămîntul Mîndra-Făgăraş, pentru cenuşele probelor 1, 2 şi 3, au rezultat valorile respective de circa 16, 13 şi 18%, iar pentru cenuşa probei 4 valoarea deosebit de ridicată de circa 43% (cariera nr. 2).

La zăcămîntul Călăţele-Huedin, se observă în adîncime, următoarea diferenţiere pe straturi *): stratul 1 şi 2 are un procent de circa 3% cenuşă, aproape egal cu cel al straturilor de profunzime 5, 6, 7 şi 8. Stratele de mijloc 3 şi 4 au un procent mult mai ridicat de cenuşă, de circa 34%. Acestei valori mari a cenuşii, îi corespunde minimum de umiditatea higroscopică (8, 9%) ca şi la proba 4 din Mîndra-Făgăraş (43% cenuşă 8,9% $U_h$). Aceasta se explică prin faptul că turba, spre deosebire de materialul anorganic, este foarte higroscopică.

Aceeaşi neuniformitate se constată la zăcămîntul Dersca-Dorohoi, la care probele 1,2 şi 4, au respectiv valorile 12,9, 13 şi 21% cenuşă, iar pentru proba 3

*) Înălţimea stratului de turbă este aceea a cuţitului de tăiat turba, circa 30 cm.

(probă de suprafaţă) corespund valorile de cea mai ridicată cenuşă (29%) şi cea mai scăzută umiditate (9,9%).

Zăcămîntul Poiana Stampei se caracterizează, spre deosebire de celelalte, printr-un procent scăzut de cenuşă, variind în limite strînse pentru probele 2, 3, 4 şi 5 (între 2—3,5%); şi aici însă, proba 1 (de adîncime de la mijlocul şantierului) arată o valoare deosebită de circa 8%, mică totuşi comparativ cu celelalte zăcăminte.

Singur zăcămîntul Miercurea-Ciuc se prezintă ca cel mai uniform din punctul de vedere al valorilor cenuşilor, şi anume, toate cele 4 probe au cenuşa cuprinsă între 8,3 şi 9,8%.

Stabilirea acestor caracteristici şi a diferenţierii lor este de o mare importanţă pentru determinarea liniei (direcţiei) de utilizare a turbelor şi a felului de explcatare — manuală sau mecanică — iar în acest ultim caz, tipul de maşină ce poate fi folosit.

*Procentul de sulf* în turbe este extrem de redus, acesta abia atingînd în unele locuri valoarea de 1%. Excepţie face zăcămîntul Dersca-Dorohoi, la care probele 2 şi 4 (probe de adîncime) au un procent de sulf egal aproximativ cu 3,7%, ceea ce este destul de mult, dovedind prezenţa unor pînze de ape sulfuroase.

Cît priveşte *puterea calorifică*, turbele au o valoare ridicată la masa combustibilă cuprinsă între 4 900—5 800 kcal/kg pentru puterea calorifică superioară, valorile mai mici aparţinînd turbei din zăcămîntul Dersca-Dorohoi, iar cele mai mari zăcămîntului Mîndra-Făgăraş.

Avînd în vedere însă că la utilizarea turbei drept combustibil interesează materialul brut care intră în focar, cu umiditatea şi cenuşa proprie fiecărui zăcămînt, se observă că puterea calorifică cea mai ridicată, calculată la masa brută, aparţine turbei de Poiana Stampei, valorile fiind cuprinse între 4 450 şi 4 900 kcal/kg, după care urmează: turba de Miercurea-Ciuc, cu puterea calorifică superioară cuprinsă între 4 100 şi 4 300 kcal/kg, Călăţele-Huedin între 3 200 şi 4 330 kcal/kg, Mîndra-Făgăraş pentru care variază între 2 700 şi 4 300 kcal/kg, şi în sfîrşit Dersca-Dorohoi, cu puterea calorifică superioară cuprinsă între 3 100 şi 4 000 kcal/kg.

*Compoziţia elementară* a probelor de turbă, considerînd aici procentul de carbon, hidrogen şi oxigen, calculate la masa combustibilă, ne dă oarecare indicaţii asupra stadiului de turbificare, mai mult sau mai puţin înaintat, în care se află respectivul zăcămînt de turbă.

Astfel, procentele de carbon mai ridicate la zăcămintele Miercurea-Ciuc şi Mîndra-Făgăraş, variind între 57,5 şi 61,2%, la care se alătură procente mai reduse de oxigen, cuprinse între 29 şi 34%, indică un grad mai avansat de îmbogăţire în carbon, deci de turbificare a turbelor respective, faţă de celelalte zăcăminte de turbă. Urmează apoi turba de Poiana Stampei cu procentele de carbon variind între 56 şi 60%, iar procentele de oxigen între 32 şi 37%, după care vine turba de Dersca-Dorohoi, avînd procentele de carbon şi oxigen curpinse între 53 şi 57%, respectiv 30,5 şi 38%; în sfîrşit, ca cea mai tînără ar apărea turba de Călăţele-Huedin, cu carbonul variind între 52 şi 59%, iar oxigenul între 32 şi 39%.

Procentul de hidrogen variază în sensul exprimat mai sus, cu diferenţe mai mici însă, fiind cuprins între 5,6 şi 6,7%.

*Stadiul de turbificare* [1] şi [2]. Determinarea acizilor humici, operaţie chimico-analitică efectuată pentru prima dată, pentru toate zăcămintele de turbă din ţara noastră, a urmărit stabilirea stadiului de înhuminizare (de turbificare) a zăcămintelor respective. Aceasta înseamnă, cu alte cuvinte, măsura în care substanţa vegetală s-a transformat în substanţă humică, primul stadiu de transformare a materialului genetic [3].

Reactivii întrebuinţaţi au fost: NaOH sol. 1% cu care acizii humici conţinuţi de turbă au fost extraşi la fierbere, sub formă de humaţi de sodiu; acid clorhidric concentrat care a servit la reprecipitarea acizilor humici din soluţia decantată de humaţi de sodiu.

După uscarea la greutate constantă în etuvă la circa 80°C, precipitatul de acizi humici a fost cîntărit şi recalculat la masa combustibilă, după ce în prealabil s-a scăzut cenuşa, rămasă eventual.

S-au făcut pentru fiecare zăcămînt cîte 2—3 probe în paralel, obţinîndu-se valorile medii, reprezentate în tabloul nr. 21.

*Tabloul nr. 21*

**Determinarea acizilor humici în turbe**

| Nr. crt. | Denumirea zăcămîntului | Acizi humici la masa comb. % | Observaţii |
|---|---|---|---|
| | | | Valorile din coloana anterioară reprezintă media pe zăcămînt. Rezultatele probelor efectuate sînt date mai jos |
| 1 | Miercurea-Ciuc | 48,80 | În cursul determinărilor s-au obţinut valorile procentuale: 47,27; 48; 49,6 |
| 2 | Mîndra-Făgăraş | 51,50 | 52,50; 50,35; 51,57 |
| 3 | Poiana Stampei | 42,68 | 43,13; 42,23 |
| 4 | Dersca-Dorohoi | 39,60 | 40,54; 38,66 |
| 5 | Călăţele-Huedin | 28,28 | 24,57; 29,00 |

După cum se poate vedea în tabloul nr. 21, zăcămintele cu turba cea mai evoluată (cantitatea cea mai mare de acizi humici rezultaţi prin transformarea substanţei vegetale) sînt Mîndra-Făgăraş şi Miercurea-Ciuc. Urmează apoi, în ordine, zăcămîntul de Poiana Stampei, Dersca-Dorohoi şi la urmă Călăţele-Huedin.

Această orînduire, dată de gradul de turbificare stabilit prin determinarea acizilor humici din turbe, se observă că este în concordanţă cu rezultatele compoziţiei elementare discutate mai înainte.

Considerînd însă aspectul macroscopic (culoare, rest vegetal, grad de fărîmiţare, cantitate de fibre etc.) aspect care apropie foarte mult turba Poiana Stampei de cea de la Călăţele-Huedin, deosebindu-le pe amîndouă de celelalte turbe, se observă o nepotrivire în procentele de acizi humici extraşi. Această constatare ni se pare deosebit de interesantă, ea dovedind şi inexactitatea stabilirii gradului de descompunere a turbelor, prin metoda de determinare vizuală [4].

Pe lîngă determinările de acizi humici efectuate asupra probelor medii de turbă pe zăcăminte, s-a mai executat o altă serie de determinări asupra unor probe luate din diferite regiuni ale zăcămintelor, extinzînd aceste cercetări în special asupra turbei de Poiana Stampei.

Rezultatul acestor ultime determinări a fost constatarea unei mari variaţii a cantităţilor de acizi humici extraşi, exemplu 52,86% pentru proba 3, Poiana Stampei, proba de adîncime de la perimetrul şantierului, sau 54% pentru proba 1, Miercurea-Ciuc etc.

Aşadar şi în ceea ce priveşte gradul de turbificare, zăcămintele noastre de turbă se dovedesc neuniforme, atît în adîncime, cît şi pe orizontală, lucru caracteristic de altfel pentru turbării.

*Temperaturile de aprindere* a turbelor, stabilite cu aparatul Feddeler, s-au dovedit variabile în limite strînse, şi valorile maxime s-au obţinut pentru zăcămîntul de Poiana Stampei şi Călăţele-Huedin. Limitele acestea sînt 210—240 °C.

*Analiza cenuşelor de turbă* [5] — [14]. În afara tuturor determinărilor la care au fost supuse turbele şi care au fost menţionate pînă acum, s-au mai efectuat analizele cenuşelor provenite din arderea lor (vezi tablourile nr. 3, 7, 11, 15 şi 19). Aceste analize dau indicaţii asupra condiţiilor istorico-geologice de formare a zăcămintelor (apă, intercalaţii de minerale, strate de argilă şi nisip etc.).

Mai important de semnalat, urmărind şi comparînd rezultatele obţinute pentru fiecare zăcămînt, considerăm că va fi cantitatea mare de CaO, ce se găseşte în cenuşa unora din turbele cercetate. Aceasta ne îndreptăţeşte să presupunem că aceste turbe provenind din substanţe vegetale fin mărunţite, s-au format în mlaştini, ale căror ape sînt bogate în ghips dizolvat. Este cazul zăcămintelor de Dersca-Dorohoi şi în parte Miercurea-Ciuc.

De asemenea, se observă la turbele de Miercurea-Ciuc şi Poiana Stampei, prezenţa unei cantităţi apreciabile de oxid de fier, lăsat de apele feruginoase, care au străbătut zăcămîntul. Acest lucru s-a putut constata şi verifica şi prin observaţia macroscopică a chirpicilor de turbă la zăcămîntul Miercurea-Ciuc, unde praful şi chiar bulgării de oxid de fier de diferite mărimi se găseau atît pe deasupra cît şi în interiorul stivelor.

Cu aparatul Bunte-Baum-Reerink au fost stabilite punctele — respectiv temperaturile — de înmuiere, topire şi curgere a cenuşilor analizate [5] şi [15] (vezi tablourile nr. 4, 8, 12, 16 şi 20). Se constată că aceste cenuşi sînt în general uşor fuzibile, temperatura variind între 880 şi 1 050°C. Temperaturile mai ridicate ale unor probe (1 000 — 1 050 °C) se datoresc procentelor de silice şi alumină, uşor crescute faţă de cele de oxid de fier şi alcalii.

Aceste determinări au o importanţă deosebită în cazul utilizării turbei în gazogene, la alegerea şi manevrarea specială a grătarului.

## CONCLUZII

Rezumînd consideraţiile făcute pînă aici asupra datelor chimico-tehnice, obţinute din lucrările efectuate asupra celor 20 de probe de turbă, putem trage concluzia asupra neuniformităţii materialului de turbă după zăcăminte, iar în acelaşi zăcămînt după straturi şi locuri.

Această neuniformitate priveşte atît dimensiunile particulelor, cît şi compoziţia lor. Astfel s-a putut face şi verificarea observaţiilor macroscopice iniţiale de la colectarea probelor de turbă.

Puterea calorifică ridicată, la turba uscată în aer, procentul mic de sulf şi conţinutul redus de cenuşă al unor zăcăminte, ne indică posibilitatea utilizării lor drept combustibil, în focare industriale cu o construcţie şi adaptare specială a grătarelor, sau la ars în uz domestic, în sobe cu focare de mare volum.

Aceasta ar fi una din cele mai importante utilizări ale turbei, sub formă de material brut, neprelucrat; utilizare locală însă, din cauza neeconomicităţii transportului, ţinînd seama de volumul extrem de mare ce-l ocupă pentru o greutate redusă.

# ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОРФОВ РНР

Сообщение I

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И СТЕПЕНИ ТОРФООБРАЗОВАНИЯ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

В настоящей работе указываются техно-химические характеристики торфов РНР, которые, совместно с испытаниями, предпринятыми с целью определения степени торфообразования, способствуют установлению свойств этих торфов.

В порядке выполнения предложенного тематического задания был исследован макроскопический характер, представляемый каждой торфозалежью, вслед за чем были проведены лабораторные испытания на 20 пробах, взятых из пяти торфоразработок.

Результаты исследований выявляют неравномерность как в отношении строения, так и в отношении состава торфов, по залежам, а в пределах одной и той же залежи — по отдельным пунктам и по пластам.

Доказывается возможность местного использования торфа, в виде необработанного материала, в качестве топлива для промышленных топок со специально конструированными и приспособленными колосниковыми решетками либо для домашних печей с топками большого размера.

# ÉTUDE CHIMIQUE ET TECHNOLOGIQUE DES TOURBES DE LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE ROUMAINE

Note I

## ÉTUDE DES CARACTÉRISTIQUES CHIMIO-TECHNIQUES ET DU DEGRÉ DE TOURBIFICATION

(RÉSUMÉ)

Le présent travail expose les caractéristiques chimico-techniques des tourbes de la République Populaire Roumaine, qui, parallèlement aux essais de détermination du degré de tourbification, contribuent à établir les propriétés de ces tourbes.

Afin de réaliser le thème proposé, on a d'abord étudié l'aspect macroscopique de chaque gisement de tourbe, puis on a procédé à l'étude en laboratoire de 20 échantillons représentant 5 exploitations.

Les résultats de ces études ont permis de constater un défaut d'uniformité caractéristique de la structure ainsi que de la composition des tourbes, selon les gisements et, dans un même gisement, selon les emplacements et les couches.

Il résulte de cette étude que la tourbe peut être utilisée sur place sous forme de matériel brut, soit comme combustible dans des foyers industriels, d'une construction particulière et avec des grilles spécialement adaptées, soit pour des usages domestiques dans des poêles ayant des foyers de grand volume.

## BIBLIOGRAFIE


1. Walter Fuchs, *Die Chemie der Kohle*. J. Springer, Berlin, 1938, p. 93.
2. I. K. Vanags, *Vihod koksa kak novîi pokazatel kacestva torfa*. Torfianaiia promîşlennosti, 1951, nr. 7.
3. I. Blum, Cercetări ştiinţifice, Ed. Bucovina, Bucureşti, 1939, vol. I, p. 220.
4. N. S. Tiuremnov, *Torfiannîie mestorojdeniia i ih razvedka*. Gosenergoizdat, Moscova-Leningrad, 1949, ed. a II-a, p. 127.
5. Fr. Schuster, *Laboratoriumsbuch für Gaswerke und Gasbetriebe aller Art*. W. Knapp, Halle (Saale), 1949, vol. I, p. 16, 39, 90 şi 128.
6. F. Treadwell, *Lehrbuch der analytischen Chemie. Quantitative Analyse*. F. Deuticke Leipzig-Viena, 1935, p. 3, 33, 57, 61 şi 528.
7. M. Dolch, *Brennstofftechnisches Praktikum*. W. Knapp, Halle (Saale), 1931, p. 22, 25, 26 şi 31.
8. A. P. Groşev, *Analiza tehnică*. Ed. tehnică, Bucureşti, 1955, p. 127.
9. Müller-Graf, *Kurzes Lehrbuch der Technologie der Brennstoffe*. Franz Deuticke, Viena, 1939, p. 172.
10. G. Chesneu, *Principes théoriques et pratiques d'analyse minérale. Cours de Chimie analytique*. Lib. pol. Ch. Beranger, Paris-Liège, 1942, p. 423 şi 427.
11. A. M. Dîmov, *Analiza tehnică a minereurilor şi metalelor*. Ed. tehnică, Bucureşti, 1952, p. 139 şi 295.
12. L. D. Glusman i I. I. Edelman, *Controli koksohimiceskogo proizvodstva*. Harkov-Moscova, 1948.
13. I. N. Kolthov i E. Sendel, *Kolicestvennîi analiz*. Goshimizdat, Moscova, 1948, p. 406 şi 777.
14. A. I. Ponomarev, *Metodî himiceskogo analiza mineralov i gornîh porod*. Moscova, 1951, vol. I, cap. V, VII şi XII.
15. Bunte u. Baum, Gas und Wasserfach, 1928, vol. 71, p. 125.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 1—2, 1956

# VALORIFICAREA $SO_2$ DIN GAZELE DE ARDERE ALE LIGNIŢILOR ÎN CENTRALELE TERMOELECTRICE

DE

I. BLUM, M. ROSENBERG şi V. TACU

## I. PREZENTAREA PROBLEMEI

Pentru dezvoltarea industriei şi agriculturii socialiste în primele două cincinale, planul de electrificare al R.P.R. prevede construirea intensă de centrale hidro- şi termoelectrice. Din totalul energiei produse la sfîrşitul celui de-al doilea cincinal, circa două treimi vor fi furnizate de centralele termoelectrice prin arderea lignitilor, a mixtelor sau a altor combustibili inferiori şi a deşeurilor combustibile, iar o treime va fi furnizată de centralele hidroelectrice.

Cantităţile mari de lignit ce se vor consuma la termocentrale şi conţinutul de sulf din ligniţii noştri, pe de o parte, importanţa crescîndă a sulfului în industrie (pentru cauciuc, coloranţi etc.) şi deficitul de sulf pe piaţa mondială pe de altă parte, ridică problema recuperării — ca atare sau ca sulf elementar — a $SO_2$ din gazele arse, rezultate la arderea ligniţilor în centralele termoelectrice.

Pentru a stabili cantităţile de S sau $SO_2$ ce ar putea fi recuperate din gazele arse, s-au luat spre exemplificare, două tipuri caracteristice de termocentrale şi anume:

— centrala mică de 10 000 kW putere instalată şi
— centrala mare de 100 000 kW putere instalată.

Considerînd cantitatea de lignit necesară pentru producerea unui kWh=1,4 kg, rezultă următoarele consumuri de combustibili, calculat în ligniţi (tabloul nr. 1)

*Tabloul nr. 1*

**Consumul de combustibil exprimat în lignit, pentru două tipuri de centrale**

| Tipul de centrală | Cantitatea de lignit consumată în | | |
|---|---|---|---|
| | o oră | o zi = 20 ore | un an = 7 000 ore |
| 10 000 kW | 14 t | 280 t | 98 000 t |
| 100 000 kW | 140 t | 2 800 t | 980 000 t |

Deci, socotind că centralele ar funcţiona în medie cu sarcină integrală, circa 20 de ore pe zi, adică aproximativ 7 000 ore/an, rezultă pentru centrala de 10 000 kW

putere instalată, un consum de circa 100 000 t ligniţi/an, iar pentru centrala termoelectrică de 100 000 kW, un consum de circa 1 000 000 t ligniţi/an.

Cantitatea de gaze arse produse, precum şi natura componenţilor din gaz — raportîndu-se la aceeaşi cantitate de cărbune — depinde de compoziţia chimică a cărbunelui utilizat în combustie.

În tabloul nr. 2 se dă analiza chimico-tehnică şi elementară a cîtorva tipuri de cărbuni din ţară.

*Tabloul nr. 2*

**Compoziţie chimico-tehnică şi elementară a cîtorva tipuri de cărbuni romîneşti**

| Nr. crt. | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tipul de cărbune | | brun lemnos (lignit) | brun lemnos (lignit) | brun lemnos (lignit) | brun mat | brun mat | brun mat |
| Simbol | | BL (1) | BL (2) | BL (3) | BM (4) | BM (5) | BM (6) |
| Analiza chimico-tehnică | Umiditate | 25,11 | 21,72 | 19,55 | 7,28 | 9,40 | 11,16 |
| | Cenuşă | 11,96 | 10,22 | 17,69 | 40,39 | 15,37 | 18,46 |
| | Cocs net | 32,49 | 29,66 | 29,66 | 26,17 | 40,24 | 38,51 |
| | Materii volatile | 30,44 | 38,40 | 33,10 | 26,16 | 34,99 | 31,87 |
| | $S_{total}$ | 1,09 | 4,06 | 5,55 | 1,67 | 4,36 | 7,23 |
| Analiza elementară | C | 42,04 | 44,35 | 40,92 | 37,00 | 51,72 | 49,29 |
| | $H_2$ | 3,40 | 3,47 | 3,44 | 3,05 | 4,17 | 3,72 |
| | $O_2$ | 15,90 | 15,64 | 12,50 | 10,19 | 14,45 | 10,15 |
| | $N_2$ | 0,60 | 1,08 | 0,70 | 0,62 | 0,73 | 0,72 |
| | $S_{comb.}$ | 0,99 | 3,52 | 5,20 | 1,47 | 4,06 | 6,50 |

Din analiza datelor tabloului nr. 2 rezultă următoarele:

— tipurile de ligniţi sau cărbuni bruni ce ar putea fi luaţi în considerare pentru a fi consumaţi în centralele termoelectrice au un procent de sulf total variind între 1% (limita inferioară) şi 7% (limita superioară);

— din sulful total conţinut în cărbune doar circa 10—25% constituie sulful sulfat, necombustibil şi nevolatil, restul de 75 pînă la 90%, prezentîndu-se sub formă de sulf combustibil (sulf sulfură şi sulf organic).

Luînd ca exemple aplicate pentru studiul compoziţiei gazelor arse, tipurile de lignit şi cărbune brun mat, BL (1), BL (2) şi BM (6) din tabloul nr. 2, rezultă prin combustie, cu exces variabil de aer, gaze arse, a căror compoziţie calitativă şi cantitativă este arătată în tablourile nr. 3, 4 şi 5.

*Tabloul nr. 3*

**Calculul combustiei lignitului BL (1) raportat la o tonă cărbune**

| Nr. crt. | Elemente pentru calculul combustiei | Compoziţia cărbunelui brut | | | | | | | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | C | $H_2$ | $S_{comb.}$ | $O_2$ | $N_2$ | Umiditate | Cenuşă | |
| 1 | Analiza elementară a cărbunelui % . . . . . | 42,04 | 3,40 | 0,99 | 15,90 | 0,60 | 25,11 | 11,96 | 100 |
| 2 | Moli element sau component/t cărbune . . . . . | 35,03 | 17,00 | 0,31 | 4,97 | 0,21 | 13,95 | — | 71,47 |
| 3 | Moli $O_2$ necesari pentru ardere/t cărbune . . . . . | 35,03 | 8,50 | 0,31 | −4,97 | — | — | — | 38,87 |
| 4 | Moli $N_2$ veniţi cu $O_2$ din aer . . | — | — | — | — | — | — | — | 147 |

*Tabloul nr. 3* *(continuare)*

Gaze arse rezultate

| Nr. crt. | Cărbune brun lemnos BL (1) combustiei | Coef. excesului de aer φ | Compoziția gazelor arse rezultate | | | | | Total gaze arse |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $CO_2$ | $SO_2$ | $H_2O_{vap.}$ | $O_2$ | $N_2$ | |
| 5 | $Nm^3$ în gaze umede/t cărbune | 1 | 784,6 | 6,94 | 693,3 | — | 3 297 | 4 781,84 |
| 6 | $Nm^3$ în gaze uscate/t cărbune | 1 | 784,6 | 6,94 | — | — | 3 297 | 4 088,54 |
| 7 | % vol. în gaze arse uscate | 1 | 19,23 | 0,17 | — | — | 80,6 | 100 |
| 8 | $Nm^3$ în gaze arse umede rezultate/t cărbune | 1,33 | 784,6 | 6,94 | 693,3 | 290,2 | 4 394 | 6 169,04 |
| 9 | $Nm^3$ în gaze arseuscate/t cărbune | 1,33 | 784,6 | 6,94 | — | 290,2 | 4 394 | 5 475,74 |
| 10 | % vol. în gaze arse uscate | 1,33 | 14,33 | 0,12 | — | 5,30 | 80,25 | 100 |
| 11 | $Nm^3$ în gaze arse umede rezultate/t cărbune | 1,66 | 784,6 | 6,94 | 693,3 | 580,4 | 5 491 | 7 556,24 |
| 12 | $Nm^3$ în gaze arse uscate/t cărbune | 1,66 | 784,6 | 6,94 | — | 580,4 | 5 491 | 6 862,94 |
| 13 | % vol. în gaze arse uscate | 1,66 | 11,45 | 0,10 | — | 8,45 | 80 | 100 |

*Tabloul nr. 4*

**Calculul combustiei lignitului BL (2) raportat la o tonă cărbune**

| Nr. crt. | Elemente pentru calculul combustiei | Compoziția cărbunelui brut | | | | | | | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | C | $H_2$ | $S_{comb.}$ | $O_2$ | $N_2$ | Umiditate | Cenușă | |
| 1 | Analiza elementară a cărbunelui % | 44,35 | 3,47 | 3,52 | 15,64 | 1,08 | 21,72 | 10,22 | 100 |
| 2 | Moli element sau component/t cărbune | 36,96 | 17,35 | 1,10 | 4,89 | 0,38 | 12,06 | — | 72,74 |
| 3 | Moli $O_2$ necesari pentru ardere/t cărbune | 36,92 | 8,67 | 1,10 | — 4,89 | — | — | — | 41,80 |
| 4 | Moli $N_2$ veniți cu $O_2$ din aer | — | — | — | — | — | — | — | 158,00 |

Gaze arse rezultate

| Nr. crt. | Cărbune brun lemnos BL (2) | Coef. excesului de aer φ | Compoziția gazelor arse rezultate | | | | | Total gaze ars |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $CO_2$ | $SO_2$ | $H_2O_{vap.}$ | $O_2$ | $N_2$ | |
| 5 | $Nm^3$ în gaze arse umede rezultate/t cărbune | 1 | 827,8 | 24,6 | 658,7 | — | 3 547 | 5 058,1 |
| 6 | $Nm^3$ în gaze arse uscate rezultate/t cărbune | 1 | 827,8 | 24,6 | — | — | 3 517 | 4 399,4 |
| 7 | % vol. în gaze arse uscate | 1 | 18,81 | 0,56 | — | — | 80,63 | 100 |
| 8 | $Nm^3$ în gaze arse umede rezultate/t cărbune | 1,35 | 827,8 | 24,6 | 658,7 | 312 | 4 727 | 6 550,1 |
| 9 | $Nm^3$ în gaze arse uscate rezultate/t cărbune | 1,35 | 827,8 | 24,6 | — | 312 | 4 727 | 5 891,4 |
| 10 | % vol. în gaze arse uscate | 1,35 | 14,05 | 0,41 | — | 5,29 | 80,25 | 100 |
| 11 | $Nm^3$ în gaze arse umede rezultate/t cărbune | 1,66 | 827,8 | 24,6 | 658,7 | 624 | 5 907 | 8 042,1 |
| 12 | $Nm^3$ în gaze arse uscate rezultate/t cărbune | 1,66 | 827,8 | 24,6 | — | 624 | 5 907 | 7 383,4 |
| 13 | % vol. în gaze arse uscate | 1,66 | 11,21 | 0,33 | — | 8,45 | 80,02 | 100 |

*Tabloul nr. 5*

**Calculul combustiei cărbunelui brun mat BM (6) raportat la o tonă cărbune**

| Nr. crt. | Elemente pentru calculul combustiei | Compoziţia cărbunelui brut | | | | | | | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | C | $H_2$ | $S_{comb.}$ | $O_2$ | $N_2$ | Umiditate | Cenuşă | |
| 1 | Analiza elementară a cărbunelui % . . . . . | 49,29 | 3,72 | 6,50 | 10,15 | 0,72 | 11,16 | 18,46 | 100 |
| 2 | Moli element sau component/t cărbune . . . . . | 41,1 | 18,60 | 2,03 | 3,18 | 0,26 | 6,20 | — | 71,37 |
| 3 | Moli $O_2$ necesari pentru ardere/t cărbune . . . . . | 41,1 | 9,30 | 2,03 | — 3,18 | — | — | — | 49,25 |
| 4 | Moli $N_2$ veniţi cu $O_2$ din aer . | — | — | — | — | — | — | — | 186,20 |

Gaze arse rezultate

| Nr. crt. | Cărbune brun mat BM (6) | Coef. excesului de aer φ | Compoziţia gazelor arse rezultate | | | | | Total gaze arse |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $CO_2$ | $SO_2$ | $H_2O_{vap.}$ | $O_2$ | $N_2$ | |
| 5 | $Nm^3$ în gaze arse umede rezultate/t cărbune . . . . . | 1 | 920,4 | 45,6 | 555,5 | — | 4 176 | 5 697,4 |
| 6 | $Nm^3$ în gaze arse uscate rezultate/t cărbune . . . . . | | 920,4 | 45,5 | — | — | 4 176 | 5 141,9 |
| 7 | % vol. gaze arse uscate . . | | 17,90 | 0,88 | — | — | 81,22 | 100 |
| 8 | $Nm^3$ în gaze arse umede rezultate/t cărbune . . . . . | 1,33 | 920,4 | 45,5 | 555,5 | 367,6 | 5 566,1 | 7 455,1 |
| 9 | $Nm^3$ în gaze arse uscate rezultate/t cărbune . . . . . | | 920,4 | 45,5 | — | 367,6 | 5 566,1 | 6 899,6 |
| 10 | % vol. gaze arse uscate . . | | 13,34 | 0,66 | — | 5,33 | 80,67 | 100 |
| 11 | $Nm^3$ în gaze arse umede rezultate/t cărbune . . . . . | 1,66 | 920,4 | 45,5 | 555,5 | 735,2 | 6 956,2 | 9 212,8 |
| 12 | $Nm^3$ în gaze arse uscate rezultate/t cărbune . . . . . | | 920,4 | 45,5 | — | 735,2 | 6 956,2 | 8 657,3 |
| 13 | % vol. gaze arse uscate . . | | 10,63 | 0,53 | — | 8,49 | 80,35 | 100 |

În calculul combustiei, aşa cum este prezentat în tablourile nr. 3, 4 şi 5, nu s-a ţinut seama de pierderile de cărbune în cenuşă şi de particulele de cărbune şi gudron, antrenate cu gazele arse, în cazul unei combustii imperfecte. Aceste pierderi sînt relativ mici în cazul unei funcţionări normale a instalaţiilor şi nu

*Tabloul nr. 6*

**Cantitatea de $SO_2$ aflată în gazele arse din combustibilii arătaţi**

| $S_{comb.}$ în cărbune | Total $SO_2$ rezultat din 100 kg cărbune | | % vol. $SO_2$ în gazele arse din | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | cărbune brun lemnos | | cărbune brun mat | |
| | kg | $m^3$ | φ = 1,33 | φ = 1,66 | φ = 1,33 | φ = 1,66 |
| 1 | 2 | 0,682 | 0,10 | 0,08 | 0,07 | *0,06* |
| 2 | 4 | 1,364 | 0,20 | 0,16 | 0,15 | 0,12 |
| 3 | 6 | 2,046 | 0,30 | 0,246 | 0,23 | 0,18 |
| 4 | 8 | 2,728 | 0,40 | 0,32 | 0,31 | 0,24 |
| 5 | 10 | 3,410 | 0,51 | 0,41 | 0,39 | 0,30 |
| 6 | 12 | 4,092 | 0,61 | 0,49 | 0,46 | 0,36 |
| 7 | 14 | 4,774 | *0,71* | 0,57 | 0,54 | 0,42 |

schimbă sensibil cifrele date, de aceea ele pot fi luate ca bază în calculul practic. Aerul ce intră în calcule este considerat la 0° și complet uscat.

În condițiile obișnuite de ardere ale ligniților în centrale termoelectrice, rezultă conform tablourilor nr. 3, 4 și 5 pentru $\varphi$ (coeficientul excesului de aer) între 1,33—1,66, la o tonă lignit ars, circa 6 000—7 500 $Nm^3$, iar la cărbune brun mat, 8 000—11 000 $Nm^3$ gaze arse.

La combustia tipurilor de lignit și cărbune brun mat menționate mai sus, considerînd procentele de sulf combustibil din cărbune variind între 1—7%, obținem în gaze arse, procente volumetrice de $SO_2$, consemnate în tabloul nr. 6.

După cum rezultă din tabloul nr. 6, procentele volumetrice de $SO_2$ din gazele arse vor varia între 0,06% (limita inferioară) și 0,71% (limita superioară).

În afară de puține tipuri de cărbuni ce conțin între 5—7% sulf combustibil în cărbune, ceilalți cărbuni din țară pot fi considerați a avea în general pînă la maximum 5% sulf combustibil, deci pînă la maximum 0,4—0,5% vol. $SO_2$ în gaze arse.

Considerînd că vom arde anual, în cele două tipuri de centrale termoelectrice, 100 000 și respectiv 1 000 000 t lignit sau cărbune brun mat, cu diferite procente de sulf combustibil, se pune problema epurării în medie a circa 750 000 000 și respectiv 7 500 000 000 $Nm^3$ gaze arse, cu aproximativ 0,06—0,6% vol. $SO_2$ pentru a recupera astfel în total:

1 314 — 13 140 t $SO_2$/an, la centrala de 10 000 kW și
13 140 — 131 400 t $SO_2$/an, la centrala de 100 000 kW

putere instalată, aceasta bineînțeles în cazul unei recuperări integrale (100%) a $SO_2$, ceea ce din punct de vedere tehnic nu este realizabil.

În cazul unei recuperări parțiale rămîne de studiat de la ce procent minim de sulf combustibil în cărbune, recuperarea ar putea deveni aplicabilă din punct de vedere economic și ce anume procedeu de valorificare a $SO_2$ din gaze trebuie preferat în baza considerentelor tehnico-economice.

## II. DESCRIEREA SUMARĂ A TUTUROR PROCEDEELOR DE RECUPERARE A $SO_2$

Toate procedeele de recuperare a $SO_2$ indicate de literatură pot fi clasificate în două mari categorii:

*A.* Procedee uscate, obținînd în general ca produs final sulf elementar.

*B.* Procedee umede, obținînd ca produs final $SO_2$ lichid sau gazos, sulfiți sau sulfați alcalini sau alcalino-pămîntoși și acid sulfuric diluat.

### *A.* PROCEDEE DE RECUPERARE PE CALE USCATĂ A $SO_2$ DIN GAZELE ARSE

În categoria procedeelor uscate s-au făcut atît încercări de epurare fără recuperarea $SO_2$ din gazele de combustie cît și încercări de epurare cu recuperare, pe următoarele căi:

#### 1. Epurare fără recuperare

1) cu adaos de calce în timpul combustiei pentru a se obține gaze arse, libere de $SO_2$;

### 2. Epurare cu recuperare

2) prin reducerea $SO_2$ pînă la sulf, cu ajutorul cocsului la temperatură ridicată;

3) prin reducerea $SO_2$ cu $H_2S$ pînă la sulf elementar în prezenţa catalizatorilor;

4) prin adsorbţia $SO_2$ pe mangal sau cărbune activ;

5) prin adsorbţia $SO_2$ pe gel de silice sau de oxid de titan.

Din analiza mai amănunţită a procedeelor de epurare pe cale uscată rezultă următoarele:

1) *Adaosul de calce în timpul combustiei* nu este posibil decît în cazul gazeificării cărbunilor în gazogene; sulful din cărbune este fixat ca sulfură, care oxidată în partea de jos a generatorului intră ca sulfat de calciu în cenuşă. Acest procedeu nu are ca scop recuperarea de $SO_2$, ci înlăturarea lui pentru a evita coroziuni. Procedeul n-a găsit aplicare în industrie.

2) *Procedeul de recuperare a $SO_2$ prin reducere la sulf elementar cu cocs* constă în trecerea $SO_2$ peste cocs, la roşu. Procedeul este rentabil cînd se lucrează cu gaze bogate în $SO_2$, consumul de cocs fiind circa 1/5 din greutatea sulfului obţinut. I. M. Secchi *arată că în cazul unor gaze sărace ce conţin doar 3% $SO_2$ şi 13% $O_2$, consumul de cocs este de 33 de ori mai mare ca greutatea sulfului obţinut* [1].

3) *Procedeul de recuperare a $SO_2$ ca sulf elementar* prin reducerea $SO_2$ cu $H_2S$ prin procedeu catalitic [2], prevede în prima fază reducerea $SO_2$ la $H_2S$ cu hidrogen sub acţiunea catalizatorilor (sulfură de fier 25% şi aluminiu 75%) şi în faza a doua, reacţia

$$SO_2 + 2H_2S \rightarrow 2H_2O + 3S$$

sub acţiunea aluminei activate, la temperatura de 100—200 °C. Sulful elementar format se depune pe catalizator, inactivîndu-l. Pentru a-l reactiva acesta este încălzit la circa 500 °C.

Procedeul pare economic la gaze concentrate în $SO_2$.

4) *Recuperarea $SO_2$ prin adsorbţie în mangal* este analizată de C. Loeser [3], comparativ faţă de alte procedee. Loeser arată că «adsorbţia de gaze în mangal scade foarte mult cu creşterea temperaturii» şi «că în comparaţie cu procedeul de spălare a $SO_2$ din gaze cu ajutorul apei, apa este mai ieftină» [3] *).

Problema utilizării mangalului pentru adsorbţia $SO_2$ nu poate fi pusă, atît din motive tehnice — temperatura joasă la care ar trebui să se facă adsorbţia — cît şi din motive economice — cantităţile mari de mangal ce ar trebui mînuite.

5) *Adsorbţia pe gel de silice sau de oxid titanic* cere o răcire foarte înaintată a gazului. Aceste încercări n-au depăşit faza de laborator.

## B. PROCEDEE DE RECUPERARE PE CALE UMEDĂ A $SO_2$ DIN GAZELE ARSE

Procedeele de recuperare a $SO_2$ pe cale umedă pot fi grupate în următoarele trei categorii:

1. recuperarea $SO_2$ prin spălarea gazelor cu compuşi organici;
2. recuperarea $SO_2$ prin spălarea gazelor cu compuşi anorganici;
3. recuperarea $SO_2$ prin spălarea cu apă.

*) p. 276—277.

### 1. Recuperarea cu compuși organici

Compușii organici ce pot fi luați în considerare pentru recuperarea $SO_2$ sînt:
1) săruri ale acizilor organici slabi;
2) baze organice;
3) sulfone sau alți compuși organici.

1) *Recuperarea $SO_2$ cu sărurile acizilor organici slabi* este mult citată în literatură. Astfel, s-a propus recuperarea bioxidului de sulf prin absorbție în soluția apoasă a sărurilor alcaline, alcalino-pămîntoase sau de amoniu, a unor acizi organici și anorganici nevolatili, avînd constanta de disociere între $1.10^{-2}$ și $1.10^{-5}$, măsurată la diluție de 1 g mol/40 l, la 25 °C. În acest scop sînt indicați acizii lactic, glicocolic, ortofosforic [4].

S-au mai propus de diverși cercetători [5], [6] utilizarea soluțiilor alcaline sau alcalino-pămîntoase ale acizilor citric, oxipropionic, sulfanilic, naftionic, metanilic, formic, benzoic, fumaric, ftalic, salicilic precum și săruri rodanice ($NH_4CNS$).

Absorbția se face după o prealabilă îndepărtare a prafului și a $SO_2$ din gaze prin spălare cu apă rece. Desorbția se face prin fierbere. Toate aceste procedee ar putea fi eventual utilizate pentru concentrarea gazelor sărace în $SO_2$ (cu 1—2% $SO_2$) rezultate din prăjirea neferoaselor și lipsite de $CO_2$. Ele nu pot fi aplicate gazelor arse din următoarele motive:

— procentul mare de $CO_2$ din gaze reacționează cu sărurile alcaline disociate provocînd pierderi de soluție absorbantă;

— răcirea gazului în vederea eliminării $SO_3$ și a prafului fie direct cu apă, fie indirect, prezintă greutăți tehnice și economice ce vor fi arătate la «procedeul de recuperare cu apă»;

— lichidele ce servesc la absorbție sînt scumpe și chiar pierderi minime rezultate la desorbție și prin antrenare de către gazele epurate, fac procedeul nerentabil.

2) *Recuperarea $SO_2$ prin absorbție cu ajutorul bazelor organice* a fost studiată în diferite țări. G. Edeleanu [7] arată posibilitatea absorbției $SO_2$ din gaze cu amine alifatice sau ciclice, hidroxilamină, hidrazină și compuși heterociclici, ca piridină și chinolină. Bioxidul de sulf este îndepărtat din aceste lichide la temperatură ridicată și apoi lichefiat.

Absorbția în amine aromatice (xilidină, toluidină) și apă, în procedeul numit «sulfinidic» permite recuperarea de aproape 100% $SO_2$ din gaze cu peste 1% $SO_2$ în vol. Capacitatea de absorbție a aminelor este de 15—20 ori mai mare ca a apei.

Oxidarea $SO_2$ la $SO_3$ este mai mică decît 1%. Ca reacție secundară are loc sulfatarea aminelor. Desulfatarea aminelor cu apă este posibilă cu sodă. Sulfatul de sodiu format este scos din circuit, cu apa de absorbție, fără pierderi sensibile de amine.

W. F. Postnikov și T. I. Kunin [8] au determinat solubilitatea $SO_2$ în toluidină, chinolină, piridină și anilină. Datele obținute sînt arătate în tabloul nr. 7.

Pe măsură ce absorb $SO_2$, soluțiile tind a se solidifica. Solidificarea poate fi împiedicată prin adaos de apă (1:1) și prin evitarea formării de soluții saturate.

Înainte de absorbție, gazele trebuie răcite și curățate de praf și $SO_3$. Curățirea gazelor se face cu ajutorul filtrelor electrostatice. Absorbția se face în două turnuri umplute cu inele Raschig. Lichidul de absorbție trebuie răcit pentru a asigura o absorbție bună. Procedeul este exoterm și dezvoltă 4,7 kcal/g $SO_2$ absorbit. Pornind de la gazele de prăjire cu 7% vol. $SO_2$ se recuperează circa 98% ajungînd final *la gaz epurat cu un conținut de 0,1% $SO_2$ rezidual.*

După I. M. Secchi [1] *procedeul este aplicabil numai pentru gaze relativ bogate*, adică la gaze avînd 1—16% $SO_2$.

*Tabloul nr. 7*

**Solubilitatea $SO_2$ în diferiţi solvenţi**

| Solvent | % $SO_2$ solvite la temperaturile de | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 18° | 40° | 80° | 100° |
| Toluidina | 35,9 | 33,2 | 14,25 | 5,47 |
| Chinolina | 49,7 | 35 | 13,50 | 1,68 |
| Piridina | 55,8 | nedeterminate | nedeterminate | nedeterminate |
| Anilina | 37,1 | nedeterminate | nedeterminate | nedeterminate |

La o instalaţie Lurgi pentru recuperarea a 30 t $SO_2$/zi, plecînd de la gaze de prăjire a piritelor cu 4% $SO_2$, consumurile specifice prevăzute pe tonă $SO_2$ 100% recuperat, sînt următoarele:

3 kg xilidină, 20 kg $Na_2CO_3$, 50—60 $m^3$ apă de răcire şi 20—25 kWh.

Dacă luăm în considerare că pierderile de xilidină provin, în general prin antrenare de către gazele epurate, rezultă că la gaze cu 0,4% $SO_2$, deci de 10 ori mai diluate ca în procedeul Lurgi, consumurile specifice calculate pe tona $SO_2$ vor fi şi ele în general de 10 ori mai mari. De asemenea pentru aceeaşi productivitate, instalaţiile vor trebui să fie mult mărite.

3) *Recuperarea $SO_2$ cu sulfone sau cu alţi compuşi organici* în care spălarea gazelor se face în scruber cu sulfone lichefiate. Regenerarea sulfonelor se face prin încălzire la 70—100°. Se pot utiliza dietil-diizopropil — sau dibutil-sulfone dar mai ales sulfonele diolefinelor conjugate ca 1,3-butadien-sulfonă, izopren — sau 2-etil-1,3-butadien-sulfonă.

Practic, se amestecă mai multe sulfone, ceea ce coboară punctul lor de topire.

A mai fost propusă spălarea gazelor ce conţin $SO_2$ cu soluţie de eter glicolic şi alţi compuşi organici, cu cel mult 3 atomi de carbon învecinaţi în lanţ, ca: eter, esteri sau amestecuri de alcooli lichizi la temperatură ordinară mono-şi dietilen-glicol-diacetat, 3-metoxi-butilacetat, etilen-glicol, metil-etil-butilacetat ş.a. Aceşti compuşi sînt stabili, absorb repede şi redau gazele acide absorbite, cu o mică cheltuială de energie calorică.

Ca şi procedeele anterioare descrise, procedeele de recuperare cu eter, esteri sau sulfone nu sînt aplicabile din cauza preţului de cost ridicat al absorbanţilor.

### 2. Recuperarea cu compuşi anorganici

Pentru îndepărtarea $SO_2$ din gaze arse, cu sau fără recuperare, prin absorbţie cu compuşi anorganici, s-au studiat următoarele procedee:

1) absorbţia cu halogenuri de Al;
2) absorbţia cu sulfaţi bazici de Al;
3) absorbţia cu sulfit de sodiu sau cu sulfit de amoniu;
4) absorbţia cu MgO;
5) absorbţia cu fosfaţi;
6) absorbţia cu carbonaţi.

1) Pentru spălarea gazelor s-a propus *folosirea de halogenuri bazice de* Al care se regenerează prin încălzire. Soluția de $Al_2(OH)_5Cl$ cu 524 g/l absoarbe la 25 °C și presiune normală 265 g $SO_2$/l.

2) S-a propus de asemenea *recuperarea $SO_2$ din gaze arse, prin tratare cu* $Al_2(SO_4)_3$, 35—50% bazic. Alcalinizarea se face prin adăugare de $Ca(OH)_2$ sau $CO_3Ca$ și îndepărtarea $SO_4Ca$ precipitat. Bioxidul de sulf absorbit este îndepărtat prin încălzire la 70—80 °C sub presiune redusă. Îmbogățirea și saturarea soluției în sulfat se poate remedia prin adăugare periodică de Al.

3) *Absorbția prin procedeul sulfit-bisulfit* a fost studiată de H. F. Johnstone, H. Read și H. Blankmeyer [9]. Studiind presiunea de echilibru a vaporilor deasupra soluțiilor de sulfit-bisulfit și cu adaos de metil-amină, aceștia stabilesc următoarele:

— capacitatea maximă de absorbție pentru $SO_2$ din gaze cu 0,3% $SO_2$ precum și consumul minim de abur pentru regenerare, se obțin la soluții având $K = 10^{-8} - 10^{-6}$;

— la procedeul de sulfit de Na, consumul de abur pentru recuperarea $SO_2$ este mai mare ca la sulfit de $NH_4$, dar din cauza nevolatilității bazei (Na), încălzirea poate fi dusă mai departe și $SO_2$ recuperat complet;

— utilitatea sistemului $SO_3Na_2$—$SO_3HNa$ este limitată din cauza micii solubilități a sulfitului.

Pentru îmbunătățirea recuperării, s-a propus [10], tratarea soluției epuizate de sulfit-bisulfit cu ZnO pentru formare de $SO_3Zn$, care este îndepărtat din soluție. Soluția este readusă în circuit și $SO_3Zn$ este uscat și descompus prin calcinare în $SO_2$ și ZnO; ultimul reintră în circuit pentru regenerarea soluțiilor bisulfitice.

După cum arată C. Mina [11], acest procedeu, studiat îndeaproape și de Zaloghin și Șuher [12], este în curs de cercetare la ICECHIM în vederea aplicării sale, în primul rînd, în uzinele metalurgice neferoase și în uzinele de acid sulfuric.

I. N. Șokin, I. M. Jegorkin și M. I. Haitovici [13] studiază presiunile parțiale asupra sistemului $SO_2 - NH_3 - H_2O$, între 20—70 °C. Condițiile optime de absorbție la acest sistem au fost găsite la soluții cu 433 g $SO_2$ și 129 g $NH_4$/l.

H. F. Johnstone [14] arată că, capacitatea de absorbție a soluției de $NH_3$—$SO_2$ pentru $SO_2$ din gaze cu 0,3% $SO_2$, se ridică pînă la 8 părți în greutate $SO_2$ la 100 părți în greutate soluție.

4) N. G. Zaloghin [15] studiază absorbția $SO_2$ din gazele arse ale centralelor termoelectrice, cu 0,3% concentrație în $SO_2$, *prin spălare în scruber cu o suspensie fină de* MgO în apă. Se formează $MgSO_3 \cdot 6H_2O$. Aproximativ 7—10% se oxidează la sulfat care rămîne în soluție, iar cristalele de sulfit precipită, se filtrează, se usucă și se descompun în cuptor rotativ la 900 °C, în MgO și $SO_2$. MgO reintră în circuit, $SO_4Mg$ se recuperează prin cristalizare.

I. L. Pesahov și B. A. Certkov [16] arată necesitatea menținerii stricte a pH-ului între 6—6,1 în cazul spălării cu suspensie de MgO. La coborîrea pH-ului acțiunea de spălare este necorespunzătoare; conținutul de $SO_4Mg$ în leșia de spălare crește pînă la 18%. Fenolul din gaze înrăutățește recuperarea. Cu adaos de piroluzită fin divizată, la o bună amestecare între gaz și suspensie, se obține $SO_4H_2$ 18—20%. Acidul fiind diluat, are domeniu redus de utilizare.

5) M. V. Merlis [17] propune *tratarea gazelor reci cu o soluție formată din 70—90% fosfat dialcalin și 10—30% fosfat monoalcalin.*

Eliminarea $SO_2$ se face prin încălzire la 90 °C.

T. D. Averbuch şi I. V. Sterşnev [18] studiind presiunile parţiale de echilibru la sistemul $Na_2HPO_4-NaH_2PO_4-SO_2-H_2O$ arată că soluţiile sînt cu atît mai bune pentru absorbţia şi desorbţia de $SO_2$, cu cît raportul $Na:PO_4^{3+}$ este mai mare. În eficacitate, soluţiile de fosfaţi sînt echivalente — pentru absorbţie de $SO_2$ — soluţiilor de sulfit-bisulfit de $NH_4$, însă preţul ridicat al fosfaţilor îngreunează concurenţa cu soluţia de $NH_4$.

6) M. E. Pozin [19] studiază pe scară de laborator, *absorbţia $SO_2$ din gaze* (cu 3—7% $SO_2$) *în soluţii de* $Na_2CO_3$ 17,5—22,5% în turn de spălare cu umplutură de inele Raschig. Soluţia de absobţie este recirculată. Reacţiile care au loc sînt:

1. $2\,Na_2CO_3+SO_2+H_2O = 2\,NaHCO_3+Na_2SO_3$
2. $2\,NaHCO_3+SO_2 = Na_2SO_3+H_2O+2\,CO_2$
3. $Na_2SO_3+SO_2+H_2O = 2\,SO_2HNa$

Creşterea procentului de $SO_2$ total din soluţie nu este uniformă, ci atinge un maximum, apoi scade. Pentru a evita precipitarea $NaHCO_3$ şi $Na_2SO_3$ în turn, la concentraţia lor maximă, trebuie menţinută în turn o temperatură de peste 60 °C, cel puţin în prima parte a procesului de absorbţie.

Loeser [3] arată că procedeul de epurare a gazelor arse, în turnuri de 30—55 m înălţime, umplute cu calcar sau dolomită calibrată a fost părăsit probabil din cauza desei înfundări a turnului.

Procedeul Kellner citat de Loeser [3] înlocuieşte turnul de absorbţie cu bazine suprapuse, în care gazul este împins în contracurent. Procedeul Frank [3] înlocuieşte, la instalaţia Kellner, carbonatul de calciu cu oxid de calciu. Toate metodele de epurare cu absorbţie, enumerate mai sus, nu pot lucra decît cu gaze în prealabil epurate şi răcite. Necesarul de apă pentru răcirea gazelor arse este foarte mare şi concentraţiile soluţiilor apoase de $SO_2$ ce rezultă sînt foarte mici. În tabloul nr. 8 se arată, după Loeser, concentraţiile soluţiilor apoase de $SO_2$, pentru diferite procente de $SO_2$, în gazele arse.

*Tabloul nr. 8*

**Concentraţiile soluţiilor apoase de $SO_2$, la diferite procente de $SO_2$, în gazele arse**

| Temp. gazului la intrare °C | kg/apă de răcire/Nm³ gaze arse | Concentraţia soluţiilor rezultate în gaze arse cu | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 1,5 | 0,75 | 0,375 | 0,15 |
| | | % vol. $SO_2$ | | | |
| 150 | 1,40 | 2,90 | 1,45 | 0,72 | 0,29 |
| 300 | 2,18 | 1,85 | 0,90 | 0,45 | 0,18 |
| 450 | 2,80 | 1,40 | 0,70 | 0,35 | 0,14 |

Dacă ne referim la tipurile de termocentrale luate exemplificativ şi luînd în considerare cifrele date de Loeser (tabloul nr. 8) se desprind următoarele consumuri minimale de apă:

—la termocentrala ce consumă 14 000 kg cărbune/oră rezultă circa $14\,000 \times 8$ Nm³ gaze arse/oră (conform tabloului nr. 4 pentru $\varphi = 1{,}66$), care necesită

la 150 °C (temp. gazelor arse), $14\,000 \times 8 \times 1{,}40 = 157$ m³ apă de răcire/oră;

la 300 °C (temp. gazelor arse), $14\,000 \times 8 \times 2{,}18 = 244$ m³ apă de răcire/oră;

— la al doilea tip de centrale, consumul de apă de răcire va fi corespunzător de 10 ori mai mare.

Cantitatea de apă de spălare nu depinde de procentul de $SO_2$, ci de cantitatea totală de gaze arse și de temperatura cu care intră în scruber.

Spălarea cu apă se poate face și cu spălătoare centrifugale și dezintegratoare cu apă sub presiune. Pentru un spălător (Thysen) cu capacitate de 100 $Nm^3$/oră, energia necesară este de circa 0,3—0,5 CP și consumul de apă de 2—3 l/$Nm^3$ gaz.

Consumurile specifice pentru obținerea, pe această cale a unei tone de $SO_2$, ar fi

apă: 400 — 4 000 $m^3$ (funcție de conc. în $SO_2$),
energie: 1 000 — 10 000 CPh,
CaO: ~ 1 000 kg.

După cum arată L o e s e r, posibilitatea folosirii procedeului de spălare cu apă a $SO_2$ depinde:

— de disponibilitatea apei reci,
— de mărimea instalațiilor de spălare respective,
— de posibilitatea dezotrăvirii apei pînă la inofensivitate, înainte de a pătrunde în rețelele publice. Aceasta necesită instalații speciale de neutralizare, de limpezire și filtrare. Pe de altă parte, prin spălarea cu apă a gazelor arse, se anihilează, prin răcire, forța de ascensiune a gazului. Trebuie deci introduse suflante sau ventilatoare plumbuite sau cromate. În cazul folosirii ventilatoarelor de fier, gazele trebuie să fie complet neacide sau să treacă fierbinți prin ventilator, adică să fie reîncălzite după ce ies din turnul de spălare.

Toate cele menționate mai sus arată că recuperarea $SO_2$ din gaze arse, prin spălare cu apă sau prin procedee ce necesită o epurare și spălare prealabilă cu apă a gazelor, este complicată din punct de vedere tehnic și îndoielnică din punct de vedere economic.

## CONCLUZII

Din datele de literatură, privind această problemă, nu se desprinde încă, pînă în prezent, o metodă practică și economică de recuperare a $SO_2$ din gazele rezultate la arderea ligniților în termocentrale.

*A.* Astfel, în grupa procedeelor de recuperare a $SO_2$ pe cale uscată:

1) procedeul de recuperare a $SO_2$ cu cocs nu este aplicabil din considerente economice (o tonă sulf consumă minimum 33 de tone cocs);

2) recuperarea cu catalizator sub formă de S elementar, nu se poate aplica decît la gaze concentrate în $SO_2$ în prezență de $H_2S$ sau H ca reducător;

3) adsorbția pe gel de Si sau Ti nu a depășit încă faza de laborator, este scumpă și încă neaplicabilă din punct de vedere economic.

*B.* La procedeele de recuperare a $SO_2$ pe cale umedă:

1) spălarea cu apă, așa cum rezultă din analiza consumurilor specificce și a investițiilor necesare, nu poate fi aplicată la gaze cu conținut redus de $SO_2$, adică tocmai gazelor arse, deoarece:

— consumul de apă este foarte mare 400 — 4 000 $m^3$/t $SO_2$;
— consumul de energie 1 000 — 10 000 CPh/t $SO_2$;
— soluțiile de $SO_2$ rezultate sînt foarte diluate și au un domeniu redus de utilizare (conc. = 0,1 — 1,4% $SO_2$),
— concentrarea soluțiilor este grea din punct de vedere tehnic și neeconomică;

2) fixarea $SO_2$ din gaze arse cu oxizi metalici (MgO, ZnO, CaO) sau cu carbonați ($CO_3Na_2$, $CO_3Ca$, $CO_3Mg$) ridică serioase probleme de investiții și de economicitate legate de:

— debitul mare de gaze arse cu concentraţie mică în $SO_2$,
— necesitatea răcirii prealabile a gazelor,
— corodarea instalaţiilor,
— pericolul blocării turnurilor de absorbţie cu carbonaţi;

3) recuperarea $SO_2$ din gaze arse prin procedee de absorbţie-desorbţie, folosind diverşi absorbenţi: baze organice, sulfiţi, fosfaţi, sulfaţi şi cloruri bazice de Al ridică problema construirii unor instalaţii asemănătoare celor folosite la desulfurarea, pe cale umedă, a gazelor de semicarbonizare şi cocsificare, gaze care sînt însă mult mai bogate în componenţi cu sulf ($H_2S$) decît gazele arse.

Dezvoltarea tehnicii combustiei în termocentrale precum şi necesitatea lărgirii bazei de materii prime pentru industria chimică impun crearea marilor combinate energochimice. La aceste combinate se vor folosi aşadar pentru ardere în termocentrală, combustibili solizi, la care s-au extras în prealabil, prin semicarbonizare sau carbonizare, toate produsele volatile (gudroane şi gaze) susceptibile a fi chimizate sau valorificate în altă parte. Pe această cale se îmbunătăţesc indicii de consum ai termocentralei, gazele arse sînt mult mai sărace în $SO_2$, în schimb o mare parte a sulfului din cărbunele folosit, poate fi recuperată prin epurarea gazului de semicarbonizare sau carbonizare, prin metode de epurare, tehnic bine puse la punct.

Trebuie menţionat că încă în 1932, V. I. Tolubinski şi I. Z. Aronov [20], au arătat că cea mai raţională metodă de utilizare a cărbunilor bruni ucrainieni, cărbuni a căror structură este asemănătoare ligniţilor romîneşti, este calea semicarbonizării lor prealabile.

Pentru a analiza comparativ economicitatea recuperării S din gazele arse sau din gazele de semicarbonizare sau cocsificare, s-au redat în tabloul nr. 9 unele date analitice precum şi unii indici economici, privind:

— recuperarea sulfului din gazele rezultate din *semicarbonizarea cărbunelui* înaintea folosirii lui în termocentrale;
— recuperarea sulfului din gazele rezultate prin *carbonizarea cărbunelui* la temperatură înaltă (cocsificare);
— recuperarea sulfului din gazele arse rezultate din *arderea directă* a cărbunelui în termocentrale.

Datele se referă la tipurile exemplificate de cărbuni BL (1), BL (2) şi BM (6), cu procente minime, medii şi maxime de sulf în compoziţie chimică elementară.

Datele tabloului nr. 9 duc la următoarele concluzii:

*a)* la aceeaşi instalaţie tip de desulfurare, cu debit de 10 000 $Nm^3$ gaz/oră, cantitatea de sulf recuperată este:
— de aproximativ 150, 30 şi 25 ori mai mare din gazele de semicarbonizare decît din gazele arse, rezultate din aceiaşi cărbuni cu procent minim, mediu şi respectiv maxim, de sulf combustibil şi volatil;
— de circa 75,16 şi 15 ori mai mare din gazele din cocsificare decît din gazele arse, rezultate din aceiaşi cărbuni, cu procentele de sulf ca mai sus;

*b)* randamentul de lucru al instalaţiei de recuperare variază în funcţie de concentraţia gazelor în $SO_2$ sau $H_2S$ după cum urmează:
— la gaze de semicarbonizare între 95,66 — 99,21%
— la gaze de cocserie între 92,19 — 98,61%
— la gaze arse între 13,00 — 82,50%
la procent minim şi maxim de sulf combustibil şi volatil în cărbune. Randamentul de recuperare este cu totul nesatisfăcător în cazul recuperării $SO_2$ din gaze arse cu procente mici de $SO_2$ în gaz şi rămîne mult inferior randamentelor obţinute

*Tabloul nr. 9*

**Date comparative asupra gazelor ce rezultă din semicocsificarea, cocsificarea sau arderea unei tone de cărbuni în termocentrale**

| Nr. crt. | Tipul de cărbune | | BL (1) | | | BL (2) | | | BM (6) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Operația | | Semicarbonizare | Cocsificare | Ardere $\varphi=1,33$ | Semicarbonizare | Cocsificare | Ardere $\varphi=1,33$ | Semicarbonizare | Cocsificare | Ardere $\varphi=1,33$ |
| 1 | Cantitatea de cărbuni utilizată | kg | 1 000 | 1 000 | 1 000 | 1 000 | 1 000 | 1 000 | 1 000 | 1 000 | 1 000 |
| 2 | Sulf total în cărbune . . . | % | 1,09 | 1,09 | 1,09 | 4,06 | 4,06 | 4,06 | 7,23 | 7,23 | 7,23 |
| 3 | Sulf combustibil în cărbune . | % | 0,99 | 0,99 | 0,99 | 3,52 | 3,52 | 3,52 | 6,50 | 6,50 | 6,50 |
| 4 | Sulf volatil din cărbune la temperatura operației . . | % | 0,33 | 0,44 | 0,99 | 1,22 | 1,62 | 3,52 | 2,17 | 2,89 | 6,50 |
| 5 | Gaze rezultate/t cărbune . . | $Nm^3$ | 100 | 240 | ~6 000 | 100 | 250 | ~6 500 | 120 | 280 | ~8000 |
| 6 | Total sulf în gaze/t cărbune . | kg | 3,3 | 4,4 | 9,9 | 12,2 | 16,2 | 35,2 | 21,7 | 28,9 | 65 |
| 7 | Grame S/$Nm^3$ gaz . . . . . | g/$Nm^3$ | 33 | 18,3 | 1,65 | 122 | 64,8 | 5,42 | 181 | 103 | 8,12 |
| 8 | Grame $HS_2$ sau $SO_2$ gaz . . | g/$Nm^3$ | 35,1 | 19,4 | 3,30 | 129,5 | 68,8 | 10,84 | 192 | 109,5 | 16,25 |
| 9 | % vol. $H_2S$ sau $SO_2$/$Nm^3$ gaz | % vol. | 2,31 | 1,28 | 0,115 | 8,5 | 4,53 | 0,38 | 12,7 | 7,2 | 0,57 |
| 10 | % $H_2S$ sau $SO_2$ rămas în gaz epurat . . . . . | % vol. | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| 11 | Rand. instalației de recuperare | % | 95,66 | 92,19 | 13,0 | 98,83 | 97,79 | 73,7 | 99,21 | 98,61 | 82,5 |
| | Date industriale privind instalațiile de recuperare | | | | | | | | | | |
| 12 | Total $H_2S$ sau $SO_2$ recuperat la inst. tip de 10 000 $Nm^3/h$ | $Nm^3$ | 221 | 118 | 1,5 | 840 | 443 | 28 | 1 260 | 710 | 46,9 |
| 13 | Total S recuperat la instalații tip de 10 000 $Nm^3/h$ . . | kg | 316 | 168,5 | 2,15 | 1 205 | 634 | 40 | 1 798 | 1 018 | 67,1 |
| 14 | Total S recuperat anual (7 200 ore) în instalația tip de 10 000 $Nm^3/h$ . . . . . | t | 2 280 | 1 213 | 15,49 | 8 660 | 4 560 | 288 | 12 860 | 7 330 | 484 |
| 15 | Volumul instalației pentru recuperarea de 10 000 t sulf/an (în unități tip a 10 000 $Nm^3/h$) . . . . . | | 4,38 | 8,25 | 646 | 1,15 | 2,19 | 34,7 | 0,776 | 1,36 | 20,60 |

în instalaţii ce prelucrează gaze de semicarbonizare sau cocsificare, chiar la cărbuni cu procent maxim de sulf combustibil şi volatil;

*c)* pentru recuperarea aceleeaşi cantităţi de sulf pe an (de ex.: 10 000 tone) numărul unităţilor tip de recuperare (cu debit de 10 000 $Nm^3$ gaz/oră) este:

1,0 — 4,5 unităţi în cazul semicarbonizării

1,5 — 8,25 unităţi în cazul carbonizării

20,6 — 646 unităţi în cazul recuperării din gaze arse

toate calculate la aceiaşi cărbuni cu procente maxime şi minime de sulf combustibil şi volatil;

*d)* volumul investiţiilor necesare este foarte mare în cazul recuperării din gaze arse, el fiind aplicat şi în cazul semicocsificării sau cocsificării, doar dacă domeniul respectiv de utilizare a gazelor combustibile impune epurarea lor de sulf (de ex.: pentru consum domestic sau pentru cuptoare Siemens Martin) sau dacă lipsa de sulf este acută şi nu poate fi remediată prin exploatare de zăcăminte de sulf nativ.

Din analiza diferitelor aspecte ale epurării $SO_2$ din gazele de ardere ale lignitilor în termocentrale, rezultă următoarele:

1. *Epurarea de $SO_2$ a gazelor arse ce rezultă la arderea lignitilor în termocentrale este realizabilă din punct de vedere tehnic, atît fără recuperarea cît şi cu recuperarea şi valorificarea $SO_2$ sau a sulfului obţinut din gazele arse.*

2. *Procedeele verificate din punct de vedere tehnic, pînă în prezent nu au găsit aplicare pe scară largă, ele nefiind valabile din punct de vedere economic.*

3. *Se poate face însă valorificarea — tehnic şi economic valabilă — a cantităţilor importante de sulf combustibil din cărbunii noştri, pe calea semicarbonizării (sau eventual a carbonizării) lignitilor sau cărbunilor bruni în genere, înaintea arderii lor în centrale termoelectrice. Procedeul valorificării complexe energochimice a cărbunilor inferiori reprezintă soluţia cea mai raţională a problemei.*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ $SO_2$, СОДЕРЖАЩЕГОСЯ В ДЫМОВЫХ ГАЗАХ ОТ СЖИГАНИЯ ЛИГНИТОВ В ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛЯХ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Большие количества лигнита, которые будут потребляться теплоэлектроцентралями и высокое содержание серы в отечественных лигнитах, с одной стороны, и возрастающее значение серы в промышленности, а также недостаток ее на мировом рынке, с другой стороны, ставят вопрос использования $SO_2$, содержащегося в отходящих газах.

Для установления количеств $SO_2$, могущих быть использованными, было взято для примера два типа ТЭЦ — одна небольшая, на 10 000 квт, а другая побольше, на 100 000 квт установленной мощности; определялось количество дымовых газов, подлежащих обработке, а также количество $SO_2$ в этих газах; критически исследовались все известные до настоящего времени методы, как по очистке, так и по рекуперации.

В результате авторы пришли к заключению, что предложенные методы рекуперации $SO_2$ из отходящих газов неприменимы с экономической точки зрения. Из дальнейших исследований возможностей использования серы или соединений серы, например, путем предварительного

полукоксования лигнитов, с целью комплексного энерго-химического использования, вытекает, что это является самым рациональным решением, как это следует из представляемых нами в этих целях данных, соответствующих отечественным лигнитам, несмотря на то, что рекуперация является частичной и касается только серы, содержащейся в летучих компонентах, образующихся в процессе пирогенизации, который предшествует энергетическому использованию.

## VALORISATION DU $SO_2$ CONTENU DANS LES GAZ DE COMBUSTION DES LIGNITES, DANS LES CENTRALES THERMO-ÉLECTRIQUES

(RÉSUMÉ)

Les grandes quantités de lignite qui seront consommées par les thermo-centrales unies au taux élevé de soufre de nos lignites, d'une part, l'importance croissante du soufre dans l'industrie et sa rareté sur le marché mondial, d'une autre, soulèvent le problème de la récupération du $SO_2$ des gaz de combustion.

Dans le but d'établir les quantités de $SO_2$ qu'on pourrait récupérer des gaz de combustion, on a pris comme exemple deux types de thermo-centrales — petite centrale de 10 000 kW et grande centrale de 100 000 kW puissance installée — et on a cherché à déterminer la quantité de gaz de combustion à manipuler, ainsi que la quantité de $SO_2$ contenue dans ces gaz de combustion; on étudie sous un angle critique tous les procédés connus jusqu'à présent et concernant l'épuration aussi bien que la récupération.

On est arrivé à la conclusion que les procédés proposés pour la récupération du $SO_2$ des gaz de combustion ne peuvent être appliqués au point de vue économique. En poussant plus loin les recherches en ce qui concerne les possibilités de récupérer le soufre ou ses composés, par exemple au moyen de la semi-carbonisation préalable des lignites dans une utilisation complexe énergo-chimique, on en conclut que c'est là la solution la plus rationnelle, ainsi qu'il ressort des données présentées à cette fin et qui correspondent aux lignites de la République Populaire Roumaine, bien que la récupération ne soit que partielle et ne se rapporte qu'au soufre des composants volatiles, engendrés au cours du processus de pyrogénation précédant l'utilisation énergétique.

### BIBLIOGRAFIE

1. I. M. Secchi, Chimia e Industria, Milano, octombrie 1937, nr. 19, p. 574.
2. T. F. Doumany, R. F. Deary a. W. E. Bradley, Ind. Eng. Chem., 1944, nr. 36, p. 329.
3. C. Loeser, *Abgase, Technik ihren Entrussung, Entstaubung und Entgiftung*, 1940.
4. * * * Imperial Chemical Industries (ICI) Ltd. England, E.P. 400 998, 1932.
5. Tamaki Nakazono, Jap. P. 172 814, 1946.
6. Rocco Fanelli u. R. F. Bacon, Germ. P. 706 833, 1941.
7. G. Edeleanu, Germ. P. 1930 şi F. P. 725 253, 1931.
8. W. F. Postnikov i T. I. Kunin, Trudî Ivanovskogo himiko-tehnologhiceskogo Instituta Ivanovo, 1939, nr. 2, p. 56.
9. H. F. Johnstone, H. Read a. H. Blankmeyer, Ind. Eng. Chem., ianuarie 1938, nr. 30, p. 101.
10. H. F. Johnstone a. A. D. Singh, Ind. Eng. Chem., august 1940, nr. 32, p. 1 037.
11. C. Mina, Revista de Chimie A.S.I.T., 1954, nr. 4.

12. N. G. Zaloghin şi S. M. Şuher, *Epurarea gazelor arse*. Ed. energetică de stat, Bucureşti, 1953.
13. I. N. Şokin, I. M. Jegorkin i M. I. Haitovici, Jurn. him. prom., iulie 1938, nr. 15, p. 10.
14. H. F. Johnstone, Ind. Eng. Chem., mai 1935, nr. 27, p. 587.
15. N. G. Zaloghin, Novoşti Tehniki, decembrie 1940, nr. 21/22, p. 46.
16. I. L. Pesahov i. B. A. Certkov, Jurn. him. prom., octombrie 1940, nr. 10, p. 6.
17. M. V. Merlis, Sov. P. 48 244, 1935.
18. T. D. Averbuch i I. V. Sterşnev, Jurn. him. prom., 1940, nr. 6, p. 13.
19. M. E. Pozin, Jurn. him. prom., 1944, nr. 6, p. 14.
20. V. I. Tolubinski i I. Z. Aronov, *Trudi po probleme kompleksnogo ispolzovaniia burih uglei i torfa USSR*. Kiev, 1951.

STUDII ȘI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 1—2, 1956

*ELECTROENERGETICĂ*

# ROLUL ELECTRONILOR ÎN TRANSMISIA ENERGIEI ELECTRICE

## CRITICA ACTUALEI TEORII

DE

ACADEMICIAN N. VASILESCU KARPEN

*Comunicare prezentată în ședința din 26 septembrie 1955*

### INTRODUCERE

1. În transportul energiei electrice prin fire, pe unde trece energia transmisă? Prin fire, sau prin cîmpurile electric și magnetic care înconjoară firele? Cu alte cuvinte, care este vehiculul energiei, electronii care circulă prin fir, sau cîmpurile din jurul firelor?

Problema a fost pusă de mult și rezolvată în urma unor discuții îndelungate, în sensul că energia nu trece prin fire, ci prin cîmpurile care le înconjoară.

Această părere este unanim acceptată și am găsit-o identic exprimată în toate tratatele de specialitate pe care le-am putut consulta*).

2. Iată cum se exprimă, în această privință, prof. G. Mie de la Universitatea din Freiberg în *Handburch der Experimentalphysik***): «Fenomenele cărora li se datorește transportul energiei electrice, *natural* că nu au loc în interiorul firelor metalice, astfel cum poate ne-am fi putut închipui altădată; locul unde se desfășoară acele fenomene, este cîmpul electromagnetic din jurul firelor».

Foarte clar și precis, dar nicidecum *natural*.

---

*) Smyhe, *Static and Dynamic Electricity*. 1939, p. 441.
J. Stratton, *Electromagnetic Theory*. 1941, p. 134.
King, *Electromagnetic Engineering*. 1945, vol. I, p. 192.
L. Bloch, *Précis d'électricité théorique*. 1933, p. 277.
Kupfmüller, *Einführung in die theoretische Electrizität*. 1934, p. 306.
Grimshel-Tomaschek, *Lehrbuch der Physik*. 1942, p. 548.
I. Constantinescu, *Transmisii electromagnetice*. 1948, p. 44.
K. A. Krug, *Bazele electrotehnicii*. 1946, p. 586.
V. Novacu, *Introducere în electrodinamică*. Ed. Acad. R.P.R., București, 1954, vol. I, p. 267.

**) G. Mie, *Handbuch der Experimentalphysik*. 1932, partea I-a, p. 107.

Trebuie observat că această părere a fost adoptată în urma a numeroase discuții, care au avut loc, și după descoperirea electronului. Găsim relatate — în parte în mod glumeț — aceste discuții în *Handbuch der Elektrizität und des Magnetismus**).

3. Nu ne-am ocupat de mecanismul transferului de energie electrică prin fire pînă în vara anului 1950, cînd am aflat că problema fusese discutată și la noi, participanții la discuție alăturîndu-se la părerea mai sus exprimată, cu excepția acad. C. Budeanu.

### Comunicări și publicații anterioare

4. În aprilie 1951, am făcut o comunicare Institutului de fizică al Academiei R.P.R. Asupra textului acestei Comunicări s-a făcut un referat curios, în care s-a arătat că această Comunicare «nu aduce nici o contribuție la problema în chestiune», deși expuneam o teorie cu totul deosebită de cea existentă. În consecință, lucrarea nu a fost publicată.

Am publicat un articol rezumativ în legătură cu această problemă în revista A.S.I.T. «Electricitatea»**).

În acest articol citam din tratatul sovietic *Bazele teoretice ale electrotehnicii****) părerea cunoscutului savant sovietic, P. Kalantarov: «Vom sublinia în mod special, că mărimile $E$ și $H$, din expresia vectorului Umov-Poynting trebuie să fie cele două părți ale cîmpului electromagnetic, adică să fie legate între ele prin ecuațiile cîmpului electromagnetic».

### Scopul prezentei comunicări

5. Revenim astăzi asupra transportului de energie prin fire, fiind convins că, în urma unei examinări atente și obiective a problemei, se va părăsi actuala teorie în favoarea unei noi teorii care corespunde în totul realității.

Critica actualei teorii nu prezintă altă dificultate decît aceea că această teorie este unanim acceptată. Din această cauză este, după cum se știe, foarte greu, dacă nu periculos, să încerci a o înlocui. Din același motiv, vom fi obligați să facem unele repetări, care altfel ar putea lipsi, și să insistăm asupra unor concluzii evidente.

### Schema unui transport de energie electrică

6. Să considerăm (fig. 1) o transmisie de energie din $A$ în $B$, cu ajutorul curentului continuu, pe un singur fir (pentru simplificarea expunerii), presupus de rezistență neglijabilă, întoarcerea curentului făcîndu-se prin pămînt, considerat la potențialul zero.

În $A$, un dinam generator de f.e.m. $\mathcal{E}_A$ produce curentul $I$ care parcurge firul și în $B$, străbate dinamul receptor de f.e.m. $\mathcal{E}_B$ vecină de $\mathcal{E}_A$.

---

*) Graetz, *Handbuch der Elektrizität und des Magnetismus*, vol. I, p. 4 și 5.
**) N. Vasilescu Karpen, Revista A.S.I.T. Electricitatea, 1952, nr. 1—2.
***) L. Neumann și P. Kalantarov, *Bazele teoretice ale electrotehnicii*. 1948, vol. III, p. 219.

Puterea $I\,\mathcal{E}_A$ este astfel transmisă în $B$, pierderea Lenz-Joule în fir fiind presupusă neglijabilă.

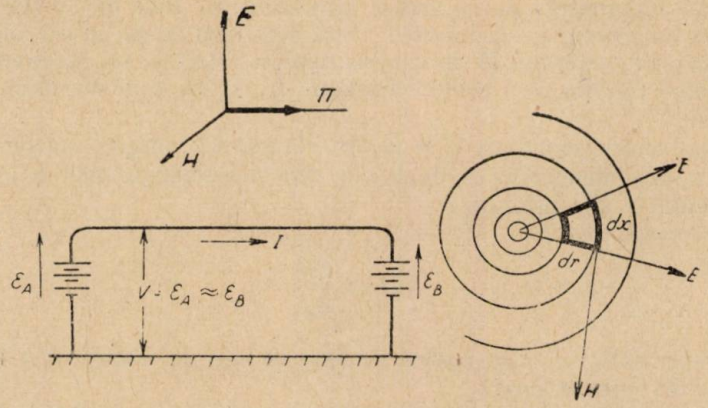



Fig. 1

În jurul firului există un cîmp magnetic $H$, reprezentat prin linii de forță aproape circulare, și un cîmp electric $E$, reprezentat prin linii de forță aproape radiale, datorit sarcinilor $q$ distribuite aproape uniform la suprafața firului.

## TEORIA CÎMPURILOR. APLICAREA VECTORULUI UMOV-POYNTING. CRITICA TEORIEI

7. Potrivit actualei teorii, pe care o vom numi *Teoria cîmpurilor*, energia este transmisă din $A$ în $B$, prin cele două cîmpuri $H$ și $E$ și anume prin intermediul vectorului *Umov-Poynting*.

Această teorie apare — după cum rezultă și din citatul de mai sus al lui G. Mie — ca o părăsire a vechilor concepții — acțiune la distanță, între particule discrete — în favoarea genialei teorii a cîmpului electromagnetic a lui Maxwell.

După o greșită interpretare a acestei teorii, *totul* trebuie să se petreacă în acest cîmp; chiar efectul Lenz-Joule din firele parcurse de curent, nu este rezultatul ciocnirilor electronilor, ci energia respectivă pătrunde în fire din exteriorul lor, prin cîmpuri.

Teoria lui Maxwell a fost însă completată ulterior prin apariția electronilor, care își reclamă rolul lor alături de cîmpuri. În consecință, teoria transferului energiei electrice prin fire ar fi trebuit să fie revizuită, ținînd seama de rolul electronilor. Aceasta nu s-a făcut însă, probabil pentru că problema nu prezintă decît un interes teoretic, fără consecințe de ordin practic, care ar fi necesitat revizuirea teoriei (desigur însă și din cauza coincidenței între valoarea energiei efectiv transmise și aceea calculată prin vectorul Umov-Poynting aplicat cîmpurilor din jurul firului).

8. *Pe ce se sprijină aserțiunea — care, deși unanim împărtășită, pare, chiar la prima vedere, contrară bunului simț — că elemente imobile și invariabile cu timpul, cum sînt cîmpurile magnetic și electric din jurul unui curent continuu, pot transporta energie?*

Aserțiunea se sprijină pe rezultatul obținut prin aplicarea vectorului Umov-Poynting — pe care-l vom numi « vector $\Pi$ » — cîmpurilor din jurul firului și pe interpretarea lui greșită. Acest vector reprezintă un flux de energie numai în cîmpul electromagnetic al lui Maxwell, după cum rezultă din însuși modul de stabilire a expresiei vectorului $\Pi$, în care se folosesc ecuațiile lui Maxwell. În aceste ecuații, cîmpul electric $E$ și cîmpul magnetic $H$, derivă unul din altul, ele nefiind independente.

În cazul nostru, cîmpurile $E$ și $H$ sînt dimpotrivă complet independente unul de altul și invariabile cu timpul, după cum sînt independente unul de altul și invariabile curentul $I$ și tensiunea $V$.

*În consecință, vectorul*

$$\Pi = \frac{EH}{4\pi}$$

nu poate reprezenta, în cazul nostru, un flux de energie. Totuși, el a fost aplicat, ca atare, după cum urmează:

9. Să considerăm (fig. 1) un plan normal pe fir și să trasăm liniile de forță ale cîmpului $H$, care sînt aproximativ cercuri concentrice, și liniile de forță ale cîmpului $E$, care sînt aproximativ radiale în apropierea firelor.

Să considerăm în punctul $E$, $H$ al planului elementul de suprafață $ds = dx\,dr$, cuprins, respectiv, între două linii de forță $E$, infinit vecine, și între două linii de forță $H$, infinit vecine.

Fluxul de energie care, potrivit teoriei cîmpurilor, ar străbate planul, este

$$P = \iint \Pi\, ds = \iint \frac{HE}{4\pi}\, dx\, dr,$$

integrala întinzîndu-se la tot planul; dar

$$\int H dx = 4\pi I,$$

integrala fiind luată de-a lungul oricărei linii de forță $H$, iar

$$\int E dr = V,$$

integrala fiind luată între fir și pămînt de potențial zero; deci,

$$P = \iint \frac{HE}{4\pi}\, dx\, dr = \int \frac{H dx}{4\pi} \cdot \int E dr = VI. \qquad (1)$$

Așadar, prin aplicarea vectorului $\Pi$ într-un plan normal pe fir se obține expresia $VI$.

În teoria electronică (punctul 12), *se demonstrează* că expresia $VI$ este egală cu $\mathcal{E}_A I$, adică cu puterea produsă și transmisă de dinamul generator.

În teoria cîmpurilor însă, aceasta *nu se poate demonstra*, pentru că nu se poate arăta, în ce mod, prin ce proces, energia $\mathcal{E}_A I$, produsă de dinam, este transmisă cîmpurilor $E$ și $H$. Nu există deci nici un motiv să se creadă că $VI$ reprezintă puterea $\mathcal{E}_A I$.

### Explicația coincidenței dintre rezultatul obținut prin aplicarea vectorului Π, și energia efectiv transmisă

10. Dacă însă nici vectorul **Π** nu ar reprezenta un flux de energie, nici $VI$, obținut prin aplicarea acestui vector, nu ar reprezenta puterea $\mathcal{E}_A I$, atunci *care este semnificația relației* (1), *care a determinat acceptarea unanimă a teoriei cîmpurilor?*

Răspunsul la această întrebare este că, deoarece

$$I = \frac{\int H dx}{4\pi} \quad \text{și} \quad V = \int E\, dr,$$

este evident că trebuie ca

$$IV = \int \frac{H dx}{4\pi} \cdot \int E dr = \iint \frac{HE}{4\pi}\, dx\, dr = P;$$

*relația* (1) *este deci o identitate matematică care are loc chiar dacă* **Π** *nu ar reprezenta un flux de energie, chiar dacă* $VI$ *nu ar reprezenta puterea* $I\mathcal{E}_A$ *a dinamului generator.*

Această evidentă identitate matematică, fără o necesară semnificație fizică, n-a fost considerată ca atare de cei care s-au ocupat pînă astăzi de problema amintită, ci au considerat-o ca o justificare a teoriei cîmpurilor și a adeziunii generale la această teorie.

Perceperea lipsei de semnificație fizică a acestei identități, necesită, poate, oarecare efort — timp de gîndire; și este explicabil ca un auditoriu sau un cititor neprevenit să nu-și dea seama de această lipsă, chiar în momentul cînd i se înfățișează problema, mai ales dacă, fiind pătruns de actuala teorie unanim acceptată, ar trebui să o părăsească.

## RECAPITULAREA OBIECȚIILOR CE SE POT FACE TEORIEI CÎMPURILOR

11. Împotriva teoriei cîmpurilor, pe lîngă faptul — suficient pentru a o respinge — că, cîmpurile $E$ și $H$, din jurul firului de transmisie, nu constituie un cîmp electromagnetic, în sensul maxwellian (fiind cîmpuri simplu suprapuse, independente de timp și independente unul de altul), acestei teorii i se mai pot face următoarele obiecții, suficiente fiecare în parte, pentru a o respinge:

Teoria nu arată modul în care cîmpurile se racordează cu dinamuri, adică cum dinamul generator transmite cîmpurilor energia sa, și cum cîmpurile transmit energia lor dinamului receptor; teoria nu arată pentru ce expresia $VI$ obținută prin aplicarea vectorului **Π**, reprezintă puterea produsă de generator.

Greșita interpretare a vectorului Umov-Poynting a condus la o consecință vădit inexactă: deoarece din cauza pierderilor ohmice, cîmpul $E$ este puțin înclinat pe planul normal pe fir, adică are o componentă paralelă cu firul, vectorul **Π** are și el o componentă normală pe fir, corespunzînd unui flux de energie care pătrunde din cîmpurile din jurul firului, în fir. Potrivit unei identități, în sensul de mai sus, acest flux egalează energia pierdută prin efectul Lenz-Joule; s-a dedus, de aici, că această energie nu este datorită mișcării electronilor în interiorul firului, ci vine din cîmpuri și intră în fir, fără a se arăta prin ce mecanism se transformă energia cîmpurilor în căldură.

În modul acesta, electronii nu joacă nici un rol, nu numai în transportul de energie, dar nici în producerea efectului Lenz-Joule, contrar teoriei electronice a metalelor.

*După cum se va vedea mai departe, în cazul curentului variabil, aplicarea teoriei cîmpurilor conduce la rezultate absurde.*

## TEORIA ELECTRONICĂ

12. Energia neputînd fi transportată prin cîmpurile din jurul firului, rămîne să examinăm dacă nu putem, sau mai bine-zis, dacă nu sîntem obligaţi să atribuim electronilor din interiorul firului, transportul de energie şi toate fenomenele care constituie sau însoţesc curentul electric, şi dacă procedînd astfel, ajungem să explicăm toate aspectele transportului de energie fie prin curent continuu, fie prin curent variabil.

### Convenţie asupra semnului sarcinii electronilor

13. Sensul convenţional al curentului electric este contrar sensului de mişcare al electronilor, iar sensul convenţional al cîmpului electric, face ca electronii supuşi unui cîmp electric, să fie solicitaţi în sensul contrar cîmpului. Această împrejurare îngreuiază expunerea fenomenelor în care intervin electronii; de aceea, pentru a evita acest neajuns, vom presupune, în cele ce urmează, că electronii sînt încărcaţi pozitiv; în acest mod, sensul curentului coincide cu sensul mişcărilor electronilor, iar electronii sînt solicitaţi în sensul cîmpului electric.

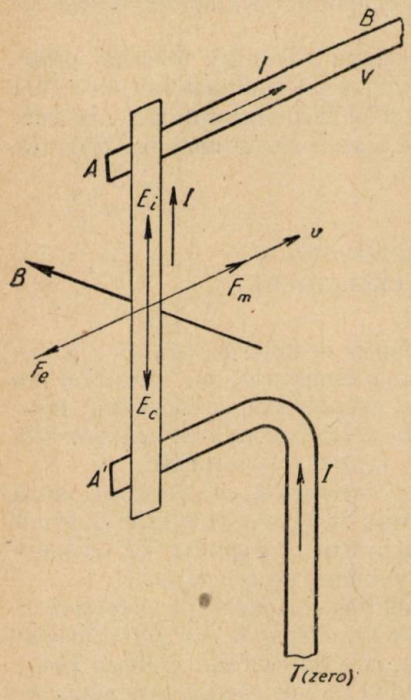



Fig. 2

### Demonstraţia expresiei VI a puterii produse de dinam

14. Să găsim expresia puterii electrice produsă de dinam şi să arătăm în ce mod puterea mecanică aplicată dinamului generator din $A$ (fig. 1), este transformată în energie electrică transmisă firului $AB$.

Să considerăm figura 2 în care indusul dinamului generator este figurat printr-un conductor $AA'$, care alunecă cu viteza $v$ pe firul de transmisie $AB$ şi pe firul $A'T$ în legătură cu pămîntul, presupus la potenţialul zero.

În mişcarea sa, conductorul $AA'$ taie liniile cîmpului de inducţie magnetică $B$ al inductorului dinamului, şi dă naştere cîmpului electric de inducţie (necoulombian) $E_i$,

$$E_i = vB.$$

Dacă
$n$ este numărul electronilor pe $cm^3$,
$l$, lungimea firului indus $AA'$,
$s$, secțiunea firului,
$e$, sarcina (presupusă pozitivă) a unui electron, sarcina totală a electronilor din fir este

$$nlse.$$

Acești electroni găsindu-se în cîmpul $E_i$, sînt supuși sumei de forțe

$$nlseE_i = nse\mathcal{E}_A,$$

$\mathcal{E}_A = lE_i = lvB$ fiind forța electromotoare a dinamului.

Această sumă de forțe împinge electronii în direcția $A'A$, încărcînd suprafața firului indus $A'A$ cu o sarcină pozitivă, crescîndă din $A'$ în $A$, distribuită astfel încît să producă un cîmp electric $E_c$ (coulombian), egal și de sens contrar cu $E$ (acțiunea egală cu reacțiunea),

$$E_i = E_c,$$

deoarece cîmpul electric rezultant în interiorul firului, trebuie să fie nul.

Cîmpul de inducție $E_i$ (necoulombian) este *limitat* la interiorul firului, producînd forța electromotoare

$$\mathcal{E}_A = lE_i.$$

Cîmpul $E_c$ (coulombian) se întinde în tot spațiul, atît în exteriorul firului, unde există singur, cît și în interiorul firului, unde este echilibrat de $E_i$. Cîmpul $E_i$ ridică potențialul firului indus de la zero în $A'$ la

$$V = lE_i = lE_c = \mathcal{E}_A,$$

în $A$ și de-a lungul firului de transport $AB$.

Aceasta se întîmplă în circuit deschis.

15. Cînd dinamul produce curentul $I$, adică atunci cînd electronii se mișcă cu viteza $i$, astfel încît sarcina care străbate pe secundă o secțiune a firului este

$$I = nsei,$$

situația rămîne aceeași în ceea ce privește distribuția potențialului de-a lungul firului indus $A'A$ și a firului de transport $AB$, în presupunerea că rezistența firelor este neglijabilă; dar forța $nlseE_i$ produce asupra electronilor puterea

$$P = nlsei = \mathcal{E}_A I.$$

$\mathcal{E}_A I$ *este puterea produsă de dinam.*

Pe de altă parte, conductorul $AA'$, parcurs de curentul $I$, găsind-se în cîmpul de inducție magnetică $B$ al inductorului, este supus acțiunii forței electromagnetice

$$F_e = IBl,$$

echilibrată de forța mecanică, de sens contrar, aplicată din exterior conductorului $AA'$,

$$F_m = IBl.$$

Această forță mișcîndu-se cu viteza $v$ în sensul acțiunii sale produce puterea

$$P' = vF_m = vIBl = \mathcal{E}_A I,$$

iar forța $F_e$, mișcîndu-se în sens contrar cu aceeași viteză $v$, *primește* puterea $P'$, care, după cum trebuie, este egală cu puterea $P$ produsă de dinam *).

### Mecanismul transportului de energie electrică

16. În rezumat, f.e.m. $\mathcal{E}_A$ ridică potențialul electronilor, care o străbat, de la zero la $V = \mathcal{E}_A$, imprimîndu-le energia potențială $eV$ la ieșirea din indus și intrarea prin $A$ în firul de transport. Electronii se deplasează pe acest fir cu energii potențiale $eV$ pînă în $B$, unde, *străbătînd* dinamul receptor, cedează energia lor, revenind la potențialul zero.

Puterea primită în $B$ este egală cu energia potențială pe secundă a electronilor care sosesc în $B$,

$$P = nsieV = IV = I\mathcal{E}_A.$$

Acesta este pe scurt modul în care energia electrică este produsă de dinamul din stațiunea $A$, este transmisă prin fir, și este primită în stațiunea $B$.

### Energie potențială

17. Să precizăm noțiunea folosită mai sus de energia potențială a electronilor.

Electronul în repaus, posedă o energie proprie situată în cîmpul datorit propriei sale sarcini. Dar electronul are și o energie potențială $eV$ determinată de potențialul $V$ al punctului unde se găsește electronul. Această energie potențială $eV$ reprezintă energia dezvoltată de electron cînd trece de la potențialul $V$ la potențialul zero.

Fiecare electron din firul de transport posedă energia potențială $eV$, și se poate spune, fără vreun neajuns, că această energie este solidară de electron și antrenată în mișcarea acestuia: dar ea *reprezintă numai o potențialitate* gata de a se manifesta oricînd, nu este însă localizată, cum este cazul energiei reprezentată prin vectorul Umov-Poynting, atunci cînd acesta este aplicabil.

### Imagini mecanice ale transportului de energie prin fire

18. Lord Kelvin spunea: « *...cînd pot găsi o imagine mecanică a unui fenomen, înțeleg fenomenul, altfel nu-l înțeleg* ».

Poate că astăzi această părere să nu mai fie totdeauna valabilă, deși chiar în cercetările relative la fenomenele atomice o imagine mecanică poate fi și este uneori folositoare.

Transportul energiei prin curent continuu are o completă analogie cu transportul hidraulic de energie.

În $A$ (fig. 3) o pompă generatoare ridică, printr-o conductă verticală $I$ m³/s de apă la înălțimea $\mathcal{E}_A$, comunicînd apei energia potențială (gravifică) $I\mathcal{E}_A$; cu această energie apa pornește pe un canal deschis, orizontal, dacă neglijăm pierderile, pînă în $B$, unde apa, printr-o conductă verticală, străbate o turbină receptoare, cedîndu-i energia.

*) Vezi și revista A.S.I.T. « Electricitatea », 1952, nr. 1—2, unde problema este tratată dintr-un punct de vedere diferit.

19. Un alt mod de transport de energie — mai exact de lucru mecanic — asemănător cu transportul electric, este transportul prin curea (fig. 4); energia este transmisă prin tensiunea $F$ a curelei întinse, fără ca între cele două stațiuni $A-B$, să existe energie localizată. Mai mult, forța $F$, transmițînd

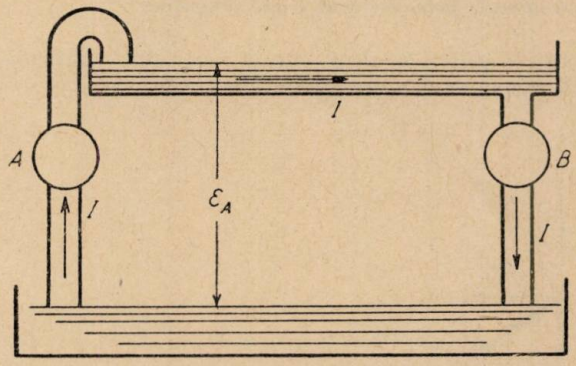



Fig. 3

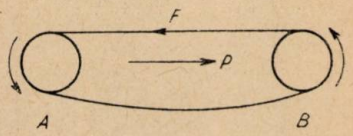



Fig. 4

puterea, se deplasează în sensul contrar sensului în care puterea $P$ este transmisă. Se pot stabili paralele interesante între acest transport mecanic și transportul electric considerat.

## TRANSPORTUL DE ENERGIE ELECTRICĂ PRIN FIR PRIVIT SUB UN ALT ASPECT

Transportul de energie considerat, poate fi privit, cu folos, dintr-un alt punct de vedere, mai general.

Firul de transport $AB$ constituie, împreună cu pămîntul (sau cu cel de al doilea fir, dacă transportul se face prin două fire), un condensator electric, care se încarcă sau se descarcă prin dinamurile $A$ și $B$.

În cazul cînd, ca în figura 1, curentul $I$ circulă în sensul $A \rightarrow B$ (de la stînga la dreapta), firul se găsește la potențialul $V$, iar electronii (presupuși pozitivi) posedă energia potențială $eV$.

La fiecare electron, al cărui potențial este ridicat de dinamul $A$ de la zero la $V$, încărcînd condensatorul cu energia $eV$, corespunde un electron care, trecînd prin dinamul $B$ de la potențialul $V$ la zero, cedează dinamului $B$ energia $eV$ cu care se descarcă condensatorul. Electronii din fir și energia transportată de electroni, circulă în același sens $A \rightarrow B$.

În cazul cînd curentul $I$ circulă în sensul $B \rightarrow A$ (adică atunci cînd f.e.m. $\mathcal{E}_A$ și $\mathcal{E}_B$ au sensul contrar celui din figura 1, potențialul firului fiind $-V$, iar energia electronilor fiind $-eV$), la fiecare electron care, străbătînd dinamul $A$, trece de la potențialul $-V$ la zero, consumînd energia $eV$, produsă de dinam și încărcînd cu această energie condensatorul, corespunde un electron care trece de la zero la $-V$, străbătînd dinamul $B$ și cedîndu-i energia $eV$, descărcînd cu această energie condensatorul. Electronii din fir circulă în sensul $B \rightarrow A$, dar energia circulă în sensul $A \rightarrow B$, deoarece, la trecerea fiecărui electron printr-o secțiune a firului, o energie potențială negativă, $-eV$, trece de la dreapta la stînga, ceea ce înseamnă că energia de partea dreaptă a secțiunii crește cu $eV$, iar de partea stîngă scade cu $eV$; energia se scurge, așadar, de la stînga la dreapta.

Acest caz are o bună analogie cu transportul energiei prin curea, reprezentat în figura 4, asimilînd potențialul firului cu tensiunea curelei.

## CAZUL CURENTULUI VARIABIL

### Transmiterea efectivă de energie prin vectorul Umov-Poynting

20. Studiul transmiterii energiei electrice prin curent variabil confirmă justețea teoriei electronice și evidențiază falsitatea teoriei cîmpurilor.

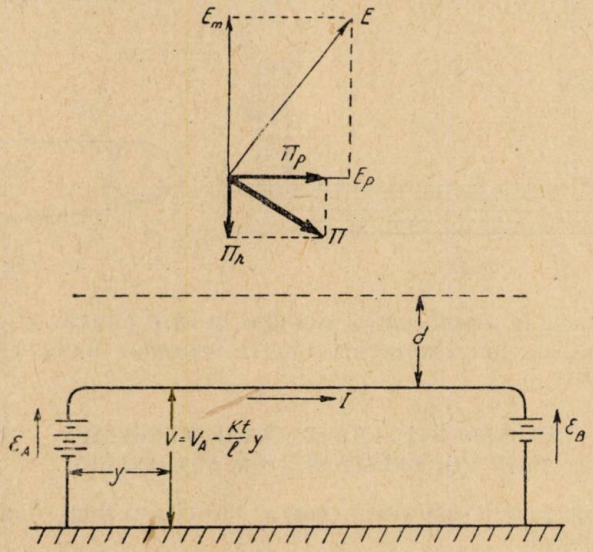



Fig. 5

Vom considera cazul cel mai simplu (fig. 5) al unui transport de energie, analog cu acela din figura 1, comportînd aceleași elemente:

un dinam generator de f.e.m. constantă $\mathcal{E}_A$,

un fir de transmisie $AB$, de lungime $l$, de rază $r$, de rezistență negliljabilă, de selfinductanță $L$ și de capacitate unitară $C$ și

un dinam receptor de f.e.m. constantă $\mathcal{E}_B$; cu deosebirea că curentul, în loc să fie continuu, crește liniar cu timpul,

$$I = I_0 + Kt.$$

Pentru a obține acest curent, trebuie ca

$$\mathcal{E}_A - \mathcal{E}_B = L\frac{dI}{dt} = LK,$$

deci,

$$\mathcal{E}_A = \mathcal{E}_B + LK.$$

Puterea plecată din $A$ este

$$IV_A = I\mathcal{E}_A = (I_0 + Kt)\,\mathcal{E}_A.$$

Puterea sosită în $B$ este

$$IV_B = I\mathcal{E}_B = (I_0 + Kt)\,\mathcal{E}_B.$$

Diferența

$$(\mathcal{E}_A - \mathcal{E}_B)\, I = LKI$$

reprezintă creșterea energiei cîmpului magnetic,

$$W = \Sigma \frac{H^2}{8\pi}\, dv = \frac{1}{2} LI^2,$$

$$\frac{dW}{dt} = LI \frac{dI}{dt} = LKI.$$

**Cîmpul $E_i$ de inducție electromagnetică și fluxul de energie corespunzător**

21. Pe lîngă cîmpurile $E$ și $H$, analoge cu cele din cazul curentului continuu, apare, în cazul de față un cîmp de inducție electromagnetică $E_i$, paralel cu firul, a cărui valoare aproximativă la distanța $d$ este

$$E_i = \frac{M}{l} \frac{dI}{dt} = \frac{MK}{l},$$

$M$ fiind coeficientul de inducție mutuală între firul $AB$ și un fir imaginar situat la distanța $d$.

Pe axul firului $AB$, acest cîmp este

$$E_i^s = \frac{LK}{l},$$

$L$ fiind selfinducția firului, iar $H$ și $E_i$ formînd un cîmp electromagnetic maxwellian.

Vectorul $\Pi' = \frac{E_i H}{4\pi}$, normal pe fir, reprezintă de data aceasta, un flux *efectiv* de energie. (Acesta este fluxul de energie ieșind din antena de radio).

Fluxul de energie, ieșind din suprafața unui cilindru coaxial cu firul $AB$ și de o mică rază $r$, trebuie să fie $LKI$ reprezentînd, după cum s-a văzut, creșterea energiei cîmpului magnetic.

Într-adevăr, ținînd seama că $H = \frac{2I}{r}$, avem

$$\Pi' \cdot 2\pi rl = \frac{LK}{l} \frac{2I}{4\pi r} 2\pi rl = LKI.$$

**APLICAREA TEORIEI ELECTRONICE**

22. În teoria electronică, puterea $LKI$ este cedată de energia potențială a electronilor care circulă între $A$ și $B$.

Energia potențială a electronilor care pornesc pe secundă din $A$ este *nsie* $V_A = IV_A$, iar a celor care sosesc în $B$ este $IV_B$; energia potențială cedată pe secundă de electroni între $A$ și $B$, este deci

$$I(V_A - V_B) = I(\mathcal{E}_A - \mathcal{E}_B) = IKL.$$

**Potențialul $V$ al firului, sarcinile superficiale $q$, și cîmpul electric $E$**

23. Potențialul firului între $A$ și $B$ nu mai este constant ca în cazul curentului continuu, ci scade liniar; la distanța $y$ de $A$, potențialul este

$$V_y = V_A - \frac{V_A - V_B}{l} y = V_A - \frac{KL}{l} y.$$

Sarcinile superficiale $q = CV$ scad de asemenea liniar (fig. 6),

$$q_y = q_A - \frac{KCL}{l} y;$$

pentru $y = l$,

$$q_A = q_B + KCL = \left(q_B + \frac{Kl}{C^2}\right).$$

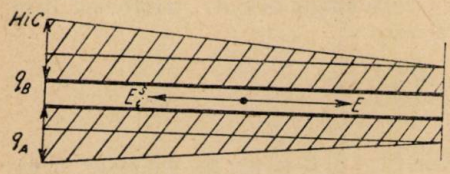



Fig. 6

Sarcinile, astfel distribuite, dau naștere cîmpului electric $E$, care, în interiorul firului, este egal și de sens contrar cu $E_i^s$ (fig. 6) pentru ca cîmpul rezultant să fie nul; în exteriorul firului, $E$ nu mai este normal pe fir, deoarece are componenta $E_p$, paralelă cu firul (fig. 5).

În vecinătatea firului

$$E_p = -\frac{dV}{dy} = \frac{KL}{l}.$$

Componenta $E_n$, normală pe fir, este legată de potențial, tot prin relația

$$V = \int E_n \, dr$$

și scade împreună cu $V$, din $A$ în $B$.

Între cîmpul magnetic $H$ și curentul $I$, există aceeași relație ca în cazul curentului continuu,

$$I = \int \frac{Hdx}{4\pi}.$$

**Concluzie**

24. *Toate particularitățile transportului de energie, atît prin curent continuu, cît și prin curenți variabili, se găsesc astfel explicate prin teoria noastră, teoria electronică, în mod coherent și fără contraziceri.*

## FALSITATEA TEORIEI CÎMPURILOR

25. Încercînd să aplicăm teoria cîmpurilor la transportul energiei prin curent variabil, în modul cum a fost aplicată transportului prin curent continuu, observăm următoarele:

După cum s-a arătat, cîmpul $E$ nu mai este normal pe fir (fig. 5), ci are o componentă normală $E_n$ și o componentă paralelă cu firul, $E_p$.

În consecință, vectorul $\mathbf{\Pi}$ nu mai este paralel cu firul, ci are o componentă $\mathbf{\Pi}_p$, paralelă cu firul și o componentă $\mathbf{\Pi}_r$, dirijată *spre* fir.

Aplicînd componenta $\mathbf{\Pi}_p$ unui plan normal pe fir, situat la distanța $y$ de $A$, obținem pentru puterea $P$, care ar traversa planul, în direcția firului,

$$P = \iint \frac{HE_n}{4\pi}\, dx\, dr = \int \frac{Hdx}{4\pi} \cdot \int E_n\, dr = IV_y = I\left(V_A - \frac{KL}{l}\, y\right),$$

adică tocmai puterea care trece prin fir în punctul $y$. Această putere scade pe unitatea de lungime cu

$$-\frac{dP}{dy} = \frac{IKL}{l},$$

iar pe toată distanța $AB$, scade cu puterea $IKL$.

În teoria electronică s-a văzut (punctul 22) că această putere este cedată de energia potențială a electronilor care circulă între $A$ și $B$, fluxului *real* de energie, pornind transversal din fir și datorit vectorului $\mathbf{\Pi}'$.

În teoria cîmpurilor — adică dacă energia ar fi transportată prin vectorul $\mathbf{\Pi}$, derivînd din cîmpurile $E$ și $H$ — se pune mai întîi întrebarea (care rămîne fără răspuns) ce devine puterea $IKL$, rezultînd din diferența între puterea $IV_A = IV_B + IKL$ plecînd din $A$ și puterea (realmente transmisă prin fir) $IV_B$, sosind în $B$?

(Nu se poate răspunde că această energie reprezintă creșterea energiei cîmpului magnetic $H$, pentru că această creștere este alimentată de *fluxul real* de energie datorit vectorului $\mathbf{\Pi}'$, a cărui existență nu poate fi discutată).

În al doilea rînd, se pune întrebarea — ce rămîne de asemenea fără răspuns — care este rostul energiei ce s-ar transporta de componenta radială $\mathbf{\Pi}_r$ a vectorului $\mathbf{\Pi}$, energie îndreptată *spre* fir? Această energie este

$$\iint \mathbf{\Pi}_r\, dr = \int \frac{Hdx}{4\pi} \cdot \int E_p^r\, dy = IE_p^r\, l,$$

$E_p^r$ fiind valoarea componentei $E_p$, la distanța $r$ de fir; în apropierea firului,

$$E_p = \frac{KL}{l},$$

deci energia transportată de $\mathbf{\Pi}_r$ ar *intra* în fir cu valoarea $IKL$. Acest flux de energie care s-ar datori componentei $\mathbf{\Pi}_r$, ar fi egal și de sens contrar cu fluxul *real* de energie datorit vectorului $\mathbf{\Pi}'$ (punctul 22).

*Așadar, prin aplicarea teoriei cîmpurilor transportului de energie prin curent variabil, se ajunge la rezultate absurde, ceea ce constituie — dacă ar mai fi fost nevoie — încă o dovadă de falsitatea teoriei cîmpurilor.*

## COMPLETARE

Găsim necesar să dezvoltăm cele arătate la punctul 11. Să considerăm transmisia de energie din figura 1, presupunînd însă că rezistența firului nu este neglijabilă, ci are o valoare finită $r$ pe unitatea de lungime.

În cazul acesta, cîmpul $E$ este înclinat pe fir (fig. 5) avînd o componentă paralelă cu firul a cărei valoare în vecinătatea firului este, la distanța $y$ de $A$.

$$E_p = \frac{dV}{dy} = rI.$$

Potrivit teoriei cîmpurilor, vectorii $H$ și $E_p$ dau naștere vectorului radial $\mathbf{\Pi}_r$, îndreptat spre fir

$$\mathbf{\Pi}_r = \frac{E_p H}{4\pi}$$

și fluxului de energie, intrînd în fir pe unitate de lungime,

$$P_r = \iint \Pi_r \, ds = \iint \frac{HE_p}{4\pi} \, dxdy = \int \frac{Hdx}{4\pi} \cdot rI = rI^2, \qquad (1')$$

adică tocmai căldura dezvoltată pe unitatea de lungime a firului, în unitate de timp.

În consecință — dar înainte de descoperirea electronului și a adevăratei cauze a efectului Lenz-Joule — s-a conchis că acest efect este datorit fluxului de energie $P_r$, venit din exterior, și găsim și astăzi în unele cărți, aceeași concluzie.

Se știe însă bine că, în realitate, căldura Lenz-Joule este datorită fenomenelor ce se petrec în interiorul firului.

Așadar, identitatea matematică (1') ca și identitatea (1), nu au nici o semnificație fizică; vectorii $\mathbf{\Pi}$ și $\mathbf{\Pi}_r$, simple expresii matematice, nu reprezintă fluxuri de energie.

*Am criticat în această lucrare* Teoria cîmpurilor; *ar fi de dorit să se arate de către adepții acestei teorii, ce obiecții se pot face* Teoriei electronice.

## РОЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

### КРИТИКА СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ТЕОРИИ

### (КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

1. Согласно существующей теории, при переносе электроэнергии (рис. 1), энергия передается через поля $E$ и $H$ и рассчитывается при помощи вектора $\mathbf{\Pi}$ Умова-Поинтинга:

$$\iint \mathbf{\Pi} \, ds = \iint \frac{HE}{4\pi} \, dx \, dr = \int \frac{Hdx}{4\pi} \cdot \int Edr = IV. \qquad (1)$$

Однако, существующая теория не может быть принята, так как:

2. Вектор $\mathbf{\Pi}$ представляет собою поток энергии только тогда, когда поля $H$ и $E$ составляют электромагнитное максвеллево поле, что в данном случае не имеет места, ибо поля $H$ и $E$ просто взаимно перекрываются и являются независимыми друг от друга.

3. Теория не может указать каким образом энергия, производимая динамомашиной в $A$, передается полям, а также почему $IV$ в зависимости (1) представляет собою переданную мощность.

4. Теория приписывает эффект Ленца-Жуля проникновению энергии полей извне в проводник, что противоречит электронной теории металлов.

5. Наконец, приложение существующей теории к передаче переменным током, приводит к нелепым выводам.

6. Указывается, что зависимость (1), приведшая к всеобщему признанию теории, является простым математическим тождеством.

7. Автор, применяя свою «электронную теорию», показывает, что в действительности передача энергии происходит при посредстве электронов, движущихся в проводнике.

8. Доказывается (рис. 2), что динамомашина в $A$ развивает мощность $I\mathscr{E}_A = VI$, повышая потенциал электронов от нуля до $V$ и сообщая им, таким образом, потенциальную энергию $eV$. За счет этой энергии лектроны движутся в проводнике и, достигнув $B$, передают ее приемной динамомашине.

Сохраняя обычные обозначения, можно написать, что энергия электронов, которые выходят за одну секунду из $A$ и тех, которые достигают $B$, выражается зависимостью:

$$nsie\,V = IV = I\mathscr{E}_A.$$

9. Электронная теория прилагается к передаче энергии током, возрастающим линейно со временем, $I = I_0 + Kt$ (рис. 5). В этом случае возникает индукционное поле $E_i$, параллельное проводнику, а через поля $H$ и $E_i$, образующие максвеллево поле, эффективно проходит мощность $\iint \frac{HE_i}{4\pi} ds$, которая выходит из проводника и распространяется в поперечном направлении, питая возрастающую энергию поля $H$.

10. Перенос энергии из $A$ в $B$ происходит также за счет электронов проводника, которые, выходя из $A$ с потенциальной энергией $nsieV_A = IV_A$ поступают в $B$ с энергией $IV_B$ поскольку, потерянная энергия $I(V_A - V_B)$ передана вышеупомянутой поперечной мощности.

11. Существующая теория, при приложении ее к этому переносу энергии, приводит к противоречащим ей результатам (рис. 6).

12. Поле $E$, создаваемое поверхностными нагрузками $q$ проводника, убывающими от $A$ до $B$, уже не является перпендикулярным проводнику (рис. 6), а следовательно, и вектор $\mathbf{\Pi}$ не является параллельным проводнику: он имеет составляющую $\mathbf{\Pi}_p$, параллельную проводнику и радиальную составляющую $\mathbf{\Pi}_r$, направленную к проводнику.

Можно легко увидеть, что поток энергии, которому соответствует компонента $\mathbf{\Pi}_p$, убывает от $A$ до $B$ и действительно превосходит переданную мощность $IV_B$.

Что касается потока энергии, направленного к проводнику, который соответствует компоненте $\mathbf{\Pi}_r$, то этот поток не имеет никакого физического смысла.

13. Таким образом, результаты, полученные путем приложения существующей теории к переносу энергии переменным током, являются лишним доказательством неправильности этой теории.

# RÔLE DES ÉLECTRONS DANS LA TRANSMISSION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

## CRITIQUE DE LA THÉORIE ACTUELLE

(RÉSUMÉ)

1. Conformément à la théorie actuelle, dans un transport d'énergie électrique (fig. 1), l'énergie est transmise par les champs $E$ et $H$ et calculée à l'aide du vecteur $\mathbf{\Pi}$, d'Umov-Poynting.

$$\iint \mathbf{\Pi}\, ds = \iint \frac{HE}{4\pi}\, dx\, dr = \int \frac{H dx}{4\pi} \cdot \int E dr = IV. \qquad (1)$$

Mais cette théorie ne peut être acceptée parce que:

2. Le vecteur $\mathbf{\Pi}$ ne représente un flux d'énergie que si les champs $H$ et $E$ constituent un champ électromagnétique maxwellien, et il n'en est pas ainsi, les champs $H$ et $E$ étant simplement superposés et indépendants l'un de l'autre.

3. Il n'est pas possible de comprendre, dans l'actuelle théorie, comment l'énergie produite par la dynamo génératrice de $A$ est transmise aux champs $E$ et $H$, ni pourquoi l'expression $VI$, de la relation (1), représente l'énergie transmise.

4. La théorie attribue l'effet Lenz-Joule à la pénétration de l'énergie des champs de l'extérieur dans le fil, contrairement à la théorie électronique des métaux.

5. Enfin, par l'application de la théorie à une transmission par courant variable, on arrive à des résultats absurdes.

6. On montre que la relation (1), qui a déterminé l'acceptation de l'actuelle théorie, est une simple identité mathématique.

7. L'auteur montre, en appliquant sa propre « théorie électronique », qu'en réalité la transmission d'énergie se fait par les électrons qui circulent dans le fil.

8. Il démontre (fig. 2) que la dynamo génératrice développe la puissance, $I\mathcal{E}_A = VI$, élevant le potentiel des électrons de zéro à $V$, leur communiquant ainsi l'*energie potentielle* $eV$.

Avec cette énergie, les électrons se déplacent à l'intérieur du fil et, en arrivant en $B$, cèdent leur énergie à la dynamo réceptrice.

Avec les notations habituelles, l'énergie des électrons qui partent par seconde de $A$, ainsi que celle des électrons arrivant en $B$, est:

$$nsieV = IV = I\mathcal{E}_A.$$

9. La théorie électronique est appliquée à un transport d'énergie par un courant croissant linéairement avec le temps:

$$I = I_0 + Kt.$$

Dans ce cas, un champ $E_i$ d'induction, parallèle au fil, prend naissance et les champs $H, E_i$ qui, cette fois, forment un champ maxwellien, sont effectivement traversés par la puissance $\iint \frac{HE_i}{4\pi}\, ds$, laquelle, sortant du fil, se propage transversalement pour alimenter l'énergie croissante du champ $H$.

10. Le transport d'énergie de $A$ en $B$ a lieu toujours par les électrons du fil, qui partent de $A$ avec l'énergie potentielle $nsieV_A = IV_A$, arrivent en $B$ avec l'énergie $IV_B$, l'énergie perdue $I(V_A - V_B)$ étant cédée à la puissance transversale ci-dessus.

11. Mais la théorie actuelle, appliquée à ce transport, conduit à des résultats (fig. 6) qui la contredisent.

12. Le champ $E$, dû aux charges superficielles $q$ du fil, décroissant de $A$ à $B$ (fig. 6), n'est plus normal au fil, en conséquence, ni le vecteur $\mathbf{\Pi}$ n'est plus parallèle au fil, ayant une composante parallèle $\mathbf{\Pi}_p$ et une composante radiale, $\mathbf{\Pi}_r$, dirigées *vers* le fil.

On voit facilement que le flux d'énergie qui correspondait à $\mathbf{\Pi}_p$ diminue de $A$ en $B$ et qu'il est plus grand que l'énergie réellement transmise.

Quant au flux *dirigé vers le fil*, qui correspondrait à la composante $\mathbf{\Pi}_r$, il n'a aucun sens.

13. De cette façon, les résultats obtenus par l'application de l'actuelle théorie au transport de l'énergie par courant variable prouvent, une fois de plus, la fausseté de l'actuelle théorie.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 1—2, 1956

# ASUPRA FUNCŢIONĂRII SUPAPELOR ELECTRONICE

DE

ACADEMICIAN C. BUDEANU

1. Redresorii şi mutatorii industriali au la baza lor principiul supapelor electronice. Cel mai simplu redresor este constituit, de fapt, dintr-o supapă electronică.

Ne propunem a releva cîteva noi aspecte ale funcţionării acestui aparat prin aplicarea proprietăţilor fenomenelor deformante. Aceste condiţii de funcţionare se extind apoi şi la funcţionarea redresorilor industriali.

2. În ultima ediţie a lucrării *Bazele electrotehnicii* sub redacţia lui C. A. Crug [1]*) se examinează funcţionarea unei supape electronice legată la o sursă de energie.

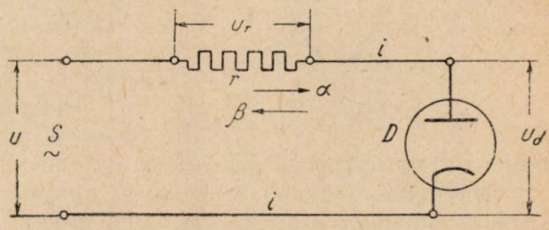



Fig. 1

În figura 1 am notat sursa prin $S$, supapa electronică prin $D$, iar rezistenţa de legătură prin $r$, care include atît rezistenţa liniei cu eventuala rezistenţă adiţională, cît şi exteriorizarea rezistenţei interne a supapei.

Tensiunea de alimentare la sursa $S$ este sinusoidală avînd forma

$$u = U_m \sin \omega t = \sqrt{2}\, U \sin \omega t. \tag{1}$$

S-au stabilit astfel, în volumul sus-menţionat, următoarele proprietăţi interesante, prin care se constată că sursa debitează:

*puterea activă* $$P = \frac{U_m^2}{4r} \tag{2}$$

*puterea aparentă* $$S = \frac{1}{2\sqrt{2}\cdot r} \cdot U_m^2 \tag{3}$$

*) p. 212.

$$\textit{putere deformantă}\quad D = \frac{1}{4r}\cdot U_m^2 \tag{4}$$

$$\textit{putere reactivă}\quad Q = \sum_1^\infty U_k I_k \sin\varphi_k = 0. \tag{5}$$

*Factorul de putere* la sursă este

$$K = \frac{P}{S} = \frac{U_m^2}{4r}\cdot\frac{2\sqrt{2}\cdot r}{U_m^2} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0{,}707. \tag{6}$$

3. Apare astfel că supapa electronică introduce un *fenomen deformant*, ea însăşi constituind un *aparat deformant*, aşa după cum o inductanţă sau o capacitate sînt aparate reactive prin faptul că introduc fenomene reactive în reţea. În consecinţă, aplicarea teoriei fenomenelor deformante, pe care am introdus-o în electrotehnică [2], [3] poate contribui la noi constatări şi la adîncirea studiului funcţionării supapelor electronice, constatări care pot fi verificate experimental [4].

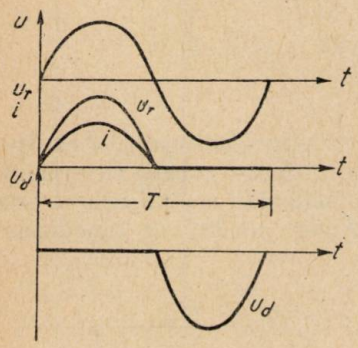



Fig. 2

4. Fie cazul cel mai simplu, al unui circuit reprezentat în figura 1, care este echivalent, de fapt, cu un sistem constituit din trei aparate în serie: *sursa S*, *supapa electronică D* şi *rezistenţa r*.

În figura 2, indicăm diagramele tensiunii $u$ la sursă, a tensiunilor $u_r$ şi $u_d$ la bornele rezistenţei $r$ şi a supapei $D$, cît şi a curentului $i$.

Observăm că numai tensiunea $u$, aplicată de sursă, este sinusoidală, celelalte tensiuni $u_r$ şi $u_d$, cît şi curentul $i$ sînt funcţii de jumătate undă (semisinusoidală), avînd deci proprietăţile unor funcţii nesinusoidale.

Expresia analitică a funcţiei $u$ este dată prin relaţia (1), iar expresiile analitice ale celorlalte funcţii se pot stabili sub forma

$$u_r = U_m\left[\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2}\sin\omega t - \frac{2}{\pi\cdot 1\cdot 3}\cos 2\omega t - \frac{2}{\pi\cdot 3\cdot 5}\cos 4\omega t \ldots\right], \tag{7}$$

$$u_d = U_m\left[-\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2}\sin\omega t + \frac{2}{\pi\cdot 1\cdot 3}\cos 2\omega t + \frac{2}{\pi\cdot 3\cdot 5}\cos 4\omega t \ldots\right], \tag{8}$$

$$i = \frac{U_m}{r}\left[\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2}\sin\omega t - \frac{2}{\pi\cdot 1\cdot 3}\cos 2\omega t - \frac{2}{\pi\cdot 3\cdot 5}\cos 4\omega t \ldots\right]. \tag{9}$$

Valoarea eficace a curentului

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} i^2\,dt} = \frac{U_m}{r}\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}}\sin^2\omega t\,dt} = \frac{1}{2}\frac{U_m}{r}. \tag{10}$$

Reziduul deformant al curentului

$$I_d = \sqrt{I^2 - I_1^2} = \frac{U_m}{r}\sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^2 - \left(\frac{1}{2\sqrt{2}}\right)^2} = \frac{U_m}{r}\frac{1}{2\sqrt{2}}, \tag{11}$$

în care prin $I_1 = \frac{U_m}{r}\frac{1}{2\sqrt{2}}$ am notat valoarea eficace a undei fundamentale a curentului.

Teoria fenomenelor deformante ne permite a stabili puterile activă, reactivă, deformantă, dezvoltate la fiecare din cele trei aparate ale circuitului considerat.

### a. Situația la sursa $S$

*Puterea activă* este aceea produsă de valorile eficace aletensiunii și ale undei fundamentale a curentului, deoarece sursa produce o tensiune sinusoidală

$$P = U \cdot I_1 \cos \varphi_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m \cdot \frac{U_m}{r}\frac{1}{2\sqrt{2}} = \frac{1}{4r} U_m^2, \tag{12}$$

în care $\varphi_1 = 0$ și deci $\cos \varphi_1 = 1$ (relațiile (1) și (9)).

În cazul particular examinat se poate deduce puterea activă și fără descompunere în serie a curentului, observînd că puterea activă este media pe unda întreagă a puterii instantanee dezvoltată în semiundă

$$P = \frac{1}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} u \cdot i \cdot dt = \frac{1}{T}\int_0^{T} u \cdot i \cdot dt = \frac{1}{T} U_m \cdot I_m \int_0^{\frac{T}{2}} \sin^2 \omega t \, dt = \frac{U_m^2}{4r}.$$

*Puterea reactivă*, pe aceleași considerații ca și pentru puterea activă, este

$$Q = U.I, \sin \varphi_1 = 0, \tag{13}$$

deoarece $U$ și $I_1$ sînt în fază ($\varphi_1 = 0$).

*Puterea deformantă*, pentru care teoria fenomenelor deformante ne dă expresia generală

$$D = \sqrt{\Sigma [U_p^2 I_q^2 + U_q^2 I_p^2 - 2 U_p U_q I_p I_q \cos (\varphi_p - \varphi_q)]},$$

în cazul particular, cînd tensiunea este sinusoidală, se reduce la forma simplă

$$D = U \cdot I_d$$

și ținînd seama de relațiile (1) și (11) obținem:

$$D = U \cdot I_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_m}{r \cdot 2\sqrt{2}} = \frac{U_m^2}{4r}. \tag{14}$$

BUDAPESTI MŰSZAKI EGYETEM KÖZPONTI KÖNYVTÁRA 1848

Rezultatele astfel obținute prin relațiile (12), (13), (14) sînt identice cu cele mai sus arătate: (2), (4), (5).

**b. Situația la rezistența $r$**

În acest aparat, după cum se vede din relațiile (7), (9) și (10), cele trei valori de puteri sînt:

*Puterea activă*

$$P = r \cdot I^2 = r \frac{U_m^2}{r^2} \frac{1}{4} = \frac{1}{4} \frac{U_m^2}{r}. \tag{15}$$

*Puterea reactivă* este nulă, situație generală pentru ori ce rezistență neinductivă în orice regim, ceea ce apare de altfel în cazul studiat și din faptul că toate undele funcțiilor $u_r$ și $i$ sînt în fază. Deci în rezistența $r$

$$Q = \Sigma U_n I_n \sin \varphi_n = 0. \tag{16}$$

*Puterea deformantă* în rezistența $r$ este de asemenea nulă, deoarece teoria fenomenelor deformante ne arată că puterea deformantă se anulează cînd toate undele de tensiune și curent sînt proporționale și în fază, deci

$$D = 0. \tag{17}$$

**c. Situația la supapa electronică $D$**

*Puterea activă* este nulă deoarece la acest aparat puterea instantanee $u \cdot i$ este permanent nulă și deci

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i \cdot dt = 0. \tag{18}$$

*Puterea reactivă* este de asemenea nulă întrucît toate undele (relațiile (8) și 9)) sînt în fază ori opoziție

$$Q = 0. \tag{19}$$

*Puterea deformantă* la acest aparat o deducem din relația teoriei fenomenelor deformante, privitoare la separația puterilor activă, reactivă, deformantă, în componența puterii aparente sub forma

$$P^2 + Q^2 + D^2 = S^2. \tag{20}$$

Deoarece în supapa electronică am găsit, prin relațiile (18) și (19), că puterile activă și reactivă sînt nule, rezultă că în acest caz $D = S$ și deci

$$D = U_d I = \frac{1}{2} U_m \frac{1}{2} U_m \frac{1}{r} = \frac{U_m^2}{4r}, \tag{21}$$

în care $I$ este valoarea eficace a curentului (10), iar $U_d$ este valoarea eficace a tensiunii la bornele supapei, care din relațiile (8), (9) și (10) se vede că este

$$U_d = rI = \frac{1}{2} U_m.$$

Observație. Concluziile de mai sus se pot obține în parte, pe o cale directă mai simplă, prin aplicarea principiului conservării, care stă la baza teoriei fenomenelor deformante.

Într-adevăr observăm, în prealabil, că rezistența $r$ este un aparat exclusiv activ (care nu dezvoltă nici putere reactivă, nici deformantă), iar supapa electronică este un aparat exclusiv deformant (în ipoteza făcută că toată rezistența sa internă o exteriorizăm în rezistența $r$).

În acest caz, pe principiul conservării, putem scrie direct că *puterea activă* $P = \frac{U_m^2}{4r}$ dezvoltată la sursa $S$ o regăsim integral în rezistența $r$, iar puterea deformantă la sursă, avînd aceeași valoare, $D = U \cdot I_d = \frac{1}{4r} U_m^2$ (dată prin relația (14)), o regăsim integral în supapa electronică.

5. Factorul de putere la sursă se deduce din expresia generală dată de teoria fenomenelor deformante, care se reduce în acest caz la

$$K = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + D^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \tag{22}$$

deoarece $Q = 0$, iar numeric $P = D$.

Se observă însă că prezența supapei deformante într-un circuit neinductiv produce un factor de putere de natură fizică, exclusiv deformantă, și căruia deci nu-i putem aplica metodele de compensare ale fenomenelor reactive, ceea ce scoate în evidență tocmai distincția fizică între fenomenele reactive și deformante.

În ceea ce privește efectul de redresare al unei supape electronice funcționînd într-un circuit monofazat, se deduce din relațiile (9) și (10), ca fiind componenta continuă realizată $I_0$ care se exprimă în funcție de valoarea eficace totală $I$ prin proporția

$$\frac{I_0}{I} = \frac{U_m}{\pi \cdot r} \cdot \frac{2 \cdot r}{U_m} = \frac{2}{\pi} = 0{,}635. \tag{23}$$

Deci, efectul de redresare al unei supape electronice în regim monofazat este destul de redus.

6. Teoria fenomenelor deformante a scos în evidență proprietatea că orice aparat deformant într-un circuit legat la o sursă $S$ produce o dublă circulație de puteri active în sens invers [5].

Acest fenomen este legat de condiția ca, componenta în armonice a tensiunii la sursă să fie diferită de aceea la bornele aparatului deformant. În special, fenomenul devine caracteristic, cînd tensiunea la sursă este sinusoidală. În acest caz circulația de putere pe unda fundamentală este de la sursă spre aparat (sensul $\alpha$, fig. 1), iar pe armonice în sens invers (sensul $\beta$, fig. 1). Această constatare este în legătură cu fenomenul fizic că forțele electromotoare de armonice au sediul în aparatul deformant.

Fenomenul apare inevitabil și în cazul unei supape electronice. Într-adevăr, el poate fi scos în evidență și prin relațiile (8) și (9), din care reiese că numai puterea activă absorbită de aparatul deformant pe unda fundamentală este pozitivă. Acelea absorbite pe toate celelalte armonice, inclusiv pe componentele continue

(armonice de ordin 0), sînt negative, întrucît pentru aceste componente semnele tensiunii şi curentului sînt inverse.

Din această constatare se deduce:

*a*) Puterea activă *primită* de aparatul deformant (în sens $\alpha$) este

$$P_1 = \left(\frac{U_m}{2\sqrt{2}}\right) \cdot \left(\frac{U_m}{2\sqrt{2}\cdot r}\right) = \frac{U_m^2}{8r}. \tag{24}$$

*b*) Aceasta trebuie să fie egală cu totalul puterii active debitată de sursă, minus aceea consumată de rezistenţa $r$, exclusiv pe unda fundamentală (relaţiile (12) şi 9))

$$P_1 = \frac{U_m^2}{4\cdot r} - r\cdot I_1^2 = \frac{U_m^2}{4\cdot r} - r\cdot\left(\frac{U_m}{2\sqrt{2}\cdot r}\right)^2 = \frac{U_m^2}{8r}$$

ceea ce verifică relaţia (24).

*c*) Puterea activă *emisă* de aparatul deformant (în sens $\beta$) şi deci pe armonice (relaţiile (8) şi (9)) este

$$P_h = \frac{U_m^2}{r}\left[\frac{1}{2\pi^2} + \frac{2}{(\pi\cdot 1\cdot 3)^2} + \frac{2}{(\pi\cdot 3\cdot 5)^2} + \cdots\right]. \tag{25}$$

Această expresie este de sens contrar lui $P_1$ şi de aceeaşi valoare absolută cu $P_1$, deoarece puterea activă totală la aparatul deformant trebuie să fie nulă (relaţia (18)).

Deci, *puterea emisă* de aparatul deformant pe armonice devine

$$P_h = P_1 = \frac{U_m^2}{8r}. \tag{26}$$

*d*) Puterea *activă totală* absorbită de rezistenţă se compune deci din aceea primită pe unda fundamentală

$$r\cdot I_1^2 = r\left(\frac{U_m}{2\sqrt{2}\,r}\right)^2 = \frac{U_m^2}{8r},$$

plus acea putere $P_h$ primită pe armonice, în sens invers, prin aparatul deformant, adică, în consecinţă, puterea activă totală în rezistenţa $r$ devine

$$r\cdot I_1^2 + P_h = 2\cdot\frac{U_m^2}{8r} = \frac{U_m^2}{4r} \tag{27}$$

şi deci în concordanţă cu relaţia (15).

7. În cazul cînd rezistenţa liniei are şi o inductanţă $L$, ea este echivalentă cu o rezistenţă simplă $r$ în serie cu o inductanţă simplă $L$. În acest caz intervin o serie de fenomene noi. Apare o consumaţie de putere reactivă pe linie şi anume $L\omega I_1^2$ pe unda fundamentală, şi $\Sigma_L k\omega I_k^2$ pe armonice în care $k$ este ordinul armonicii, iar $I_1$, $I_k$ valorile eficace ale undei fundamentale şi ale armonicilor de ordin $k$. Unda fundamentală de curent este defazată faţă de aceea a tensiunii la sursă. Puterile reactive de ordin $k$ se deplasează între inductanţa liniei şi supapa electronică. Inductanţa $L$ devine şi ea sediul unei puteri deformante de forma

$$D_L = \sqrt{\Sigma[(k-p)\,L\omega I_k I_p]^2}.$$

Principiul conservării continuă a se aplica, dar expresiile respective trebuie să ţină seama şi de puterile reactive şi deformante ale liniei [6].

Și în acest caz însă, aparatul deformant este receptor pe unda fundamentală și generator pe armonice.

Proprietățile de detaliu ale acestei situații depășesc cadrul prezentei Comunicări.

8. În regim bifazat schema de montaj este aceea din figura 3, iar diagramele curenților $i_1$, $i_2$, $i = i_1 + i_2$ sînt date în figura 4. Expresiile celor trei curenți se deduc din (9) așa cum se indică în relațiile (28).

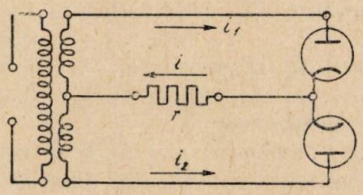



Fig. 3

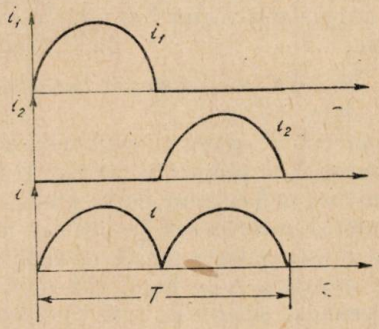



Fig. 4

$$\left.\begin{aligned} i_1 &= I_m\left[\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2}\sin\omega t - \frac{2}{\pi\cdot 1\cdot 3}\cos 2\omega t - \frac{2}{\pi\cdot 3\cdot 5}\cos 4\omega t \ldots\right], \\ i_2 &= I_m\left[\frac{1}{\pi} - \frac{1}{2}\sin\omega t - \frac{2}{\pi\cdot 1\cdot 3}\cos 2\omega t - \frac{2}{\pi\cdot 3\cdot 5}\cos 4\omega t \ldots\right], \\ i &= i_1 + i_2 = \frac{2I_m}{\pi}\left[1 - \frac{2}{1\cdot 3}\cos 2\omega t - \frac{2}{3\cdot 5}\cos 4\omega t \ldots\right]. \end{aligned}\right\} \quad (28)$$

Ajungem astfel la următoarele principale constatări:

*a*) Valoarea medie a curentului $i$ în rezistența $r$

$$I_0 = \frac{2\,I_m}{\pi}. \quad (29)$$

*b*) Valoarea eficace a curentului total $i$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (30)$$

*c*) Componenta continuă $I_0$ raportată la valoarea eficace totală devine

$$\frac{I_0}{I} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \approx 0{,}9. \quad (31)$$

Se obține deci un fenomen de redresare superior situației din regim monofazat (23).

*d*) Puterea deformantă pe fiecare fază a secundarului transformatorului a rămas cu aceeași valoare. Însă sensurile puterilor deformante pe cele două faze sînt inverse, deoarece tensiunea $u$ are totdeauna un sens invers față de curenții celor două supape ($i_1$ și $i_2$).

Întrucît puterile deformante se conservă vectorial și se transferă tot pe baza principiului conservării, rezultă că puterea deformantă totală pe primarul transformatorului este nulă [7].

Curentul primar trebuie să fie deci practic sinusoidal. Această concluzie cît și forma celor trei curenți (fig. 3) au fost verificate experimental. Acest montaj de supape electronice constituie un exemplu de compensare a fenomenelor deformante.

*În regim trifazat* schema de montaj a supapelor electronice constituie extinderea aceleia din regim bifazat. În acest caz procesul de redresare este încă și mai bun.

9. În cazul unui *redresor industrial* în montaj hexafazat s-au stabilit următoarele date [8] *):

Factorul de putere pe secundarul unui sîmbure al transformatorului 0,552.

Factorul de putere pe primar și fază ..... 0,955.

Puterea deformantă pe secundar și sîmbure de transformator $D_1 = 1{,}515\ P$.

Puterea deformantă pe primar și sîmbure de transformator $D_2 = 0{,}314\ P$, în care $P$ este puterea activă pe sîmbure de transformator.

Se constată și în acest caz o importantă compensare a puterii deformante între secundar și primar, rezultînd din compensarea a o parte din puterile deformante între diversele faze ale sistemului hexafazat pe același sîmbure de transformator. Factorul de putere e de natură deformantă, ca la orice supapă electronică.

10. Concluziile teoretice ale fenomenelor deformante au fost confirmate experimental [4]**).

Am întreprins o astfel de verificare într-un caz concret al unei supape electronice analog cu acela din figura 1. Am constatat astfel pe cale experimentală:

Valoarea eficace a tensiunii alimentînd circuitul ..... $U = 118{,}89$ V

Valoarea eficace a curentului stabilit în circuit ..... $I = 0{,}357$ A

Puterea activă debitată de sursă, măsurată printr-un wattmetru de precizie ..... $P = 30$ W.

Din aceste date se deduce:

puterea deformantă a circuitului considerat

$$D = \sqrt{U^2 \cdot I^2 - P^2} = \sqrt{(118{,}89 \cdot 0{,}357)^2 - 30^2} = 30{,}02 \text{ Vad.}$$

Valorile $P$=30 W și $D$=30,02 Vad diferă între ele cu mai puțin decît erorile posibile de măsură.

Factorul de putere devine astfel:

$$K = \frac{P}{S} = \frac{30}{118{,}89 \cdot 0{,}357} \approx 0{,}708$$

și deci în concordanță cu valorile teoretice stabilite prin relațiile (6) și (22).

11. Principalele concluzii care se desprind din cele expuse mai sus sînt:

Supapa electronică este un aparat deformant, căreia i se poate aplica deci teoria fenomenelor deformante.

În funcționarea supapei electronice se verifică principiul conservării atît asupra puterilor active, reactive cît și deformante.

*) vol. II, p. 1679.

**) p. 13.

Se verifică, în conformitate cu teoria fenomenelor deformante, că între sursă și supapa electronică avem o circulație de putere, în sens invers pe unda fundamentală și armonice.

Factorul de putere este de natură deformantă și se poate stabili pe cale teoretică ținînd seama de natura sa.

Proprietățile funcționării supapelor electronice ca aparate deformante se extind la aplicațiile industriale sub formă de redresori și mutatori [8] *), [9] **).

Teoria fenomenelor deformante care stă la baza funcționării supapelor electronice a putut fi verificată experimental [4].

În general, teoria fenomenelor deformante ne permite a adînci studiul circuitelor conținînd supape electronice, cît și studiul funcționării redresorilor industriali.

## О РАБОТЕ ЭЛЕКТРОННЫХ КЛАПАНОВ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Электронный клапан, стоящий в основе промышленной реализации выпрямителей и инверторов, является деформирующим прибором. Разработанная автором теория деформирующих явлений выявляет новые подробности работы этих приборов, позволяя в то же время более углубленное изучение их свойств.

Отмечается возможность проверки принципа сохранения активной и деформирующей мощностей. В соответствии с теорией деформирующих явлений можно также проверить тот факт, что между источником и электронным клапаном происходит циркуляция активной мощности в противоположные стороны на основной и гармонической волнах.

Работа электронного клапана заключает в себе фактор мощности деформирующего характера, следовательно, иного физического характера, чем фактор мощности реактивных явлений.

Деформирующие свойства электронных клапанов находят промышленное применение в виде выпрямителей и инверторов.

Теория деформирующих явлений, лежащая в основе работы электронных клапанов, была подвергнута автором экспериментальной проверке.

## SUR LE FONCTIONNEMENT DES SOUPAPES ÉLECTRONIQUES

(RÉSUMÉ)

La soupape électronique, qui est à la base des réalisations industrielles des redresseurs et des mutateurs, est un appareil déformant. La théorie des phénomènes déformants, élaborée par l'auteur, met en évidence de nouveaux aspects du fonctionnement de ces appareils, tout en permettant l'approfondissement de leurs propriétés.

*) p. 1570, 1657, 1692.
**) p. 41.

Le principe de la conservation des puissances, active et déformante, est vérifié. Conformément à la théorie des phénomènes déformants, on vérifie également une circulation de puissance active, en sens inverse, sur l'onde fondamentale et les harmoniques entre la source et la soupape électronique.

Le fonctionnement de la soupape électronique comporte un facteur de puissance de nature déformante et, par conséquent, d'une nature physique différente de celle du facteur de puissance des phénomènes réactifs.

Les propriétés déformantes des soupapes électroniques s'étendent aux applications industrielles sous forme de redresseurs et mutateurs.

La théorie des phénomènes déformants, à la base du fonctionnement des soupapes électroniques, a été soumise par l'auteur à des vérifications expérimentales.

## BIBLIOGRAFIE

1. C. A. Crug, *Osnovî elektrotehniki.* Gosenergoizdat, Moscova, 1952.
2. C. Budeanu, *Puissances réactives et fictives.* Institutul romîn de energie I.R.E., București, 1927.
3. — *Quelques considérations sur le rôle physique des puissances instantanées.* Bul. Șc. politehnice, București, 1929.
4. — *Quelques confirmations expérimentales de la théorie des phénomènes déformants.* Acad. Rom., Memoriile Secțiunii științifice, 1939, Seria III, t. XIV, nr. 13.
5. — *Sur le fonctionnement d'un appareil déformant.* C.R. Acad. Sci. Paris, 1934.
6. — *Kapazitäten und Induktivitäten als verzerrende Elemente.* Arhiv für Elektrotehnik, Berlin, 1938.
7. — *Sur le transfert des phénomènes déformants.* C.R. Acad. Sci. Paris, 1936.
8. A. Mauduit, *Machines électriques.* Paris, 1931.
9. A. Glaser u. K. Müller Lübeck, *Theorie der Strohmrichter.* Berlin, 1935.
10. C. Budeanu, *Aspecte tehnice ale fenomenelor reactive și deformante.* Electricitatea, București, 1951, nr. 2 și 3.
11. — *Asupra compensării și localizării fenomenelor deformante într-o rețea electrică.* Rev. Univ. «C. I. Parhon» și Electrotehnica, București, 1952.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 1—2, 1956

# ASUPRA FORMELOR OPTIME ALE FORŢEI ELECTROMOTOARE ŞI INDUCTANŢEI ÎN MAŞINILE CU INDUCTANŢA VARIABILĂ

DE

M. MARINESCU
MEMBRU CORESPONDENT AL ACADEMIEI R.P.R.

şi M. POPOV

## 1. CONSIDERAŢII PRELIMINARE

În lucrarea de faţă se determină forma tensiunii şi forma inductanţei care permit să se realizeze un anumit lucru mecanic pe ciclu de funcţionare cu o maşină cu inductanţă variabilă de greutate minimă. Aceste forme optime de variaţie ale tensiunii şi inductanţei sînt determinate în următoarele ipoteze:

*a)* rezistenţa bobinei este neglijabilă faţă de inductanţa acesteia în întreaga gamă de variaţie a inductanţei;

*b)* efectul pierderilor Hysteresis şi Foucault este neglijabil;

*c)* sistemul mecanic este astfel alcătuit încît permite o variaţie arbitrară a inductanţei în timp.

În lucrare se pune în evidenţă existenţa unei valori optime a energiei transformate în lucru mecanic cînd se dă profilul circuitului magnetic şi variaţia inductanţei în timp. Se studiază problema în ipoteza că se realizează această energie optimă.

Studiul se efectuează pe baza produsului dintre suprafaţa de fier $S$ şi suprafaţa ferestrei $\mathcal{S}$, deoarece greutatea minimă în cazul energiei optime este determinată univoc de produsul $S\mathcal{S}$. În această formă se tratează mai întîi problema pornind de la premisa că se dă forma arbitrară a tensiunii de intrare şi se caută forma inductanţei (paragraful 5). În paragrafele 6 şi 7 se rezolvă problema în ipoteza că se dă forma inductanţei şi se caută forma f.e.m. aplicate.

Pe baza acestor rezultate se trag concluzii asupra măsurii în care se poate îmbunătăţi funcţionarea unei maşini parametrice prin schimbarea formei f.e.m. aplicate, atrăgînd totodată atenţia asupra inconvenienţelor pe care le prezintă forma optimă a f.e.m. rezultată din calcul.

## 2. RESTRICŢII ASUPRA FORMELOR DE VARIAŢIE ALE INDUCTANŢEI ŞI TENSIUNII ÎN TIMP

Se consideră o inductanţă variabilă arbitrară în timp, de forma: $\frac{1}{l(t)} = y(t)$.

Asupra lui $y(t)$ se fac următoarele restricţii:

*a)* $y(t)$ este o funcţie periodică de perioadă $T$, deci:
$y(t) = y(t + kT)$, unde $k$ este un număr întreg (2.1).

*b)* $y(t)$ este limitat superior şi inferior de două mărimi pozitive, deci

$$\frac{1}{L_{max}} \leqslant y(t) \leqslant \frac{1}{L_{min}}. \tag{2.2}$$

Întrucît variaţia inductanţei este datorită unei forţe electromagnetice, rezultă din condiţiile de mai sus o serie de restricţii asupra tensiunii $e(t)$. În primul rînd, forţa $f$ care acţionează asupra elementului mobil trebuie de asemenea să fie periodică cu perioada $T$, deci:

$$f(t) = f(t + kT) \quad , \quad k \text{ întreg} \tag{2.3}$$

Forţa $f(t)$ are însă expresia (2.4)

$$f(t) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dl}{dx} = \frac{1}{2} i^2 \frac{d\left(\frac{1}{y}\right)}{dt} \cdot \frac{dt}{dx}.$$

Deoarece $f(t)$, $\frac{d\frac{1}{y}}{dt}$ şi $\frac{dt}{dx}$ sînt periodice cu perioada $T$ rezultă că şi $i^2$ este o funcţie periodică cu perioada $T$.

Întrucît $i^2$ nu depinde de semnul lui $i$, aceasta se traduce prin condiţia

$$i(t) = \pm i(t + kT), \qquad k \text{ întreg.} \tag{2.5}$$

Pentru a nu avea componentă de curent continuu în expresia lui $i$ este suficient ca $i$ să satisfacă condiţia

$$i(t) = (-1)^k i(t + kT), \qquad k \text{ întreg} \tag{2.6}$$

Asupra formei lui $i(t)$ se pot impune şi alte condiţii, dar aceasta ar atrage consecinţa că nu s-ar lucra la sincronism.

Pe de altă parte, în ipoteza că rezistenţa înfăşurării şi pierderile Hysteresis şi Foucault sînt neglijabile, curentul $i$ este dat de formula:

$$i = \frac{\int_{t_0}^{t} e\,dt}{l} = \left(\int_{t_0}^{t} e\,dt\right) y(t). \tag{2.7}$$

Ţinînd seama de condiţiile (2.1) şi (2.6) asupra lui $y(t)$ şi $i(t)$, rezultă că

$$\int_{t_0}^{t} e\,dt = (-1)^k \int_{t_0}^{t_0+kt} e\,dt, \quad k \text{ întreg.} \tag{2.8}$$

Derivînd în raport cu $t$ se obţine

$$e(t) = (-1)^k \quad e(t + kT). \tag{2.9}$$

Punînd în expresia (2.8) $k = 1$ şi $t = t_1$ se găseşte

$$2\int_{t_0}^{t} e\,dt + \int_{t_1}^{t_1+T} e\,dt = 0. \tag{2.10}$$

Cu expresia (2.10) se determină timpul $t_0$ cînd se dă o origine de timp arbitrară $t_1$ şi o f.e.m., $e(t)$ satisfăcînd condiţia (2.9).

În afară de aceste restricţii $e(t)$ şi $y(t)$ sînt arbitrare.

### 3. PRODUSUL DINTRE SUPRAFAŢA DE FIER ŞI SUPRAFAŢA FERESTREI

După cum s-a stabilit într-un referat anterior tratînd despre greutatea minimă a maşinilor parametrice, greutatea minimă este bine determinată, la un regim de funcţionare dat, de produsul dintre suprafaţa de fier $S$ şi suprafaţa ferestrei $\mathbb{S}$ atunci cînd raportul $S\,\mathbb{S}$ poate fi variat arbitrar. Pentru a stabili condiţiile optime de funcţionare, este prin urmare necesar să stabilim expresia produsului $S\,\mathbb{S}$ în cazul în care forma tensiunii este arbitrară.

Suprafaţa ferestrei $\mathbb{S}$ este dată de expresia

$$\mathbb{S} = \frac{nI_{ef}}{\delta k_u} \tag{3.1}$$

unde

$n$ este numărul de spire,
$I_{ef}$ este curentul eficace,
$\delta$ este densitatea de curent,
$k_u$ este factorul de umplere.

Pe de altă parte, secţiunea de fier $S$ este determinată de inducţia maximă admisibilă în fier prin relaţia

$$S = \frac{\varphi_{max}}{B_{max}} = \frac{\psi_{max}}{nB_{max}} = \frac{\int_{t_0}^{t} e\,dt}{nB_{max}} \tag{3.2}$$

unde

$\varphi_{max}$ este fluxul maxim în fier,
$\psi_{max}$ este fluxul maxim al bobinei, egal cu $n\varphi_{max}$
$B_{max}$ este inducţia maximă în fier.

În ultima egalitate din formula (3.2), limita inferioară $t_0$ este aleasă conform condiţiei (2.10).

Din expresiile (3.1) şi (3.2) rezultă:

$$S\,\mathbb{S} = \frac{\int_{t_0}^{t} edt_{\max}\, I_{ef}}{B_{\max}\,\delta K_u} = \frac{TP_m}{\dfrac{P_m}{I_{ef}}\,\dfrac{1}{\dfrac{1}{T}\left(\int_{t_0}^{t} edt\right)_{\max}}\,B_{\max}\,\delta K_u} \tag{3.3}$$

unde $P_m$ este puterea transformată în lucru mecanic. Din formula (3.3) se vede că dacă se dă $TP_m$, adică energia transformată în lucru mecanic în decursul unei perioade a inductanţei, produsul $S\,\mathbb{S}$ este cu atît mai mic cu cît este mai mare factorul

$$F = \frac{P_{\max}}{\dfrac{1}{T}\left(\int_{t_0}^{t} edt\right)_{\max} I_{ef}} = K\frac{E_{ef}}{\dfrac{1}{T}\left(\int edt\right)_{\max}} \tag{3.4}$$

unde s-a notat $K$ factorul de putere.

În consecinţă, forma tensiunii şi forma inductanţei trebuie să fie alese astfel încît factorul $F$ din formula (3.4) să fie maxim.

## 4. ENERGIA OPTIMĂ TRANSFORMATĂ ÎN LUCRU MECANIC ÎN TIMPUL UNEI PERIOADE $T$

În cazul unui circuit magnetic dat, condiţia ca inducţia $B$ să nu depăşească valoarea de saturaţie atrage relaţia

$$4\pi ni_{\max} = \left(\int Hdl\right)_{\max} \tag{4.1}$$

Ţinînd seama de formula (3.1) se găseşte

$$\mathbb{S} = \frac{ni_{\max}}{\delta K_u}\,\frac{I_{ef}}{i_{\max}} = \frac{\left(\int Hdl\right)_{\max}}{4\pi\,\delta K_u}\,\frac{I_{ef}}{I_{\max}} \tag{4.2}$$

Considerînd formula (4.2) se vede că suprafaţa $\mathbb{S}$ este bine determinată cînd se dă profilul circuitului magnetic şi variaţia inductanţei în timp.

Pe de altă parte, din referatul amintit mai sus rezultă că greutatea minimă se obţine pentru

$$\frac{S}{\mathbb{S}} = \rho^4 \cong 0{,}24. \tag{4.3}$$

În aceste condiţii produsul $S\,\mathbb{S}$ este bine determinat de relaţiile (4.3) şi (4.2). Ţinînd seama şi de relaţia (3.3) se vede că $TP_m$, care reprezintă energia transformată în lucru mecanic în timpul unei perioade $T$, este bine determinat cînd se dă profilul circuitului magnetic şi variaţia inductanţei în timp.

Dacă mașina se proiectează pentru altă energie pe ciclu, va trebui să aibă loc o abatere de la relația (4.3), ceea ce atrage o sporire a raportului dintre greutate și energia pe ciclu.

## 5. RELAȚII GENERALE ÎN CAZUL ÎN CARE SE DĂ FORMA F.E.M. ȘI SE CAUTĂ FORMA OPTIMĂ A INDUCTANȚEI

După cum rezultă din formula (3.4), în cazul în care se dă $e(t)$, factorul $F$ (deci produsul $S\,\mathcal{S}$), depinde numai de factorul de putere $K$. În consecință, $y(t)$ trebuie determinat astfel încît factorul de putere $K$ să fie maxim.

După cum se știe, factorul de putere este maxim și egal cu 1 cînd între curent și tensiune există o relație de proporționalitate. Acest caz, cu totul idealizat, permite totuși să se tragă unele concluzii folositoare pentru dezvoltările care urmează. Ținînd seama de expresia (2.7) se găsește

$$i = \left(\int_{t_0}^{t} e\,dt\right) y(t) = \frac{e}{\rho} \tag{5.1}$$

Din această formulă rezultă că $y(t)$ trebuie să fie de forma

$$y(t) = \frac{1}{\rho}\,\frac{e}{\int_{t_0}^{t} e\,dt} \tag{5.2}$$

Remarcăm că în acest caz nu se mai respectă inegalitățile (2.2), inductanța trebuind să varieze de la $-\infty$ la $+\infty$. În ipoteza acestei variații care face $K = 1$, factorul $F$ din formula (3.4) devine

$$F = \frac{E_{ef}}{\frac{1}{T}\left(\int e\,dt\right)_{\max}} \tag{5.3}$$

expresia care depinde numai de $e(t)$. Pentru ca $F'$ să fie maxim, trebuie ca $e(t)$ să fie de forma unor impulsuri de durată infinit mică și înălțime infinită. În acest caz, factorul $F$ tinde la infinit, iar produsul $S\,\mathcal{S}$ tinde către zero.

Pe de altă parte însă, raportul $\mathcal{S}/S$ tinde către zero, deoarece $i$ este dat de (5.1), și $I_{ef}$ tinde către zero o dată cu $E_{ef}$. Din formula (4.2) se găsește $\mathcal{S} = 0$, iar din (4.3) $S = 0$, deci energia optimă este conform cu (3.3), zero. Prin urmare se poate enunța următoarea *concluzie*:

Raportul dintre greutatea unei mașini cu inductanță variabilă și travaliul pe ciclul de funcționare, scade și tinde către zero cînd tensiunea $e(t)$ tinde către forma unor impulsuri de durată infinit mică și infinit de mari, iar $y(t)$ tinde către forma (5.2). Energia optimă pe ciclu care se poate transmite cu o asemenea mașină scade de asemenea și tinde către zero.

Pentru a studia problema ținînd seama de inegalitățile (2.2), se pot folosi metodele calculului variațional. Pentru a nu repeta demonstrația dată într-o lucrare

anterioară şi pentru a obţine şi unele rezultate noi, vom da mai jos o demonstraţie bazată pe inegalitatea Buniacovski-Shwartz

$$\int_{x_1}^{x_2} f(x)\, g(x)\, dx \leqslant \sqrt{\int_{x_1}^{x_2} f^2(x)\, dx \int_{x_1}^{x_2} g^2(x)\, dx}. \tag{5.4}$$

Punînd în loc de $x$, $t$ în loc de $f(x)$, $e(t)$ şi în loc de $g(x)$, $i(t)$, luînd în locul limitelor $x_1$ şi $x_2$, limitele $t_0$ şi $t_0 + T$ şi împărţind inegalitatea (5.4) cu $T$, se găseşte inegalitatea cunoscută $K \leqslant 1$ şi se verifică uşor că semnul egal intervine cînd $e = \rho i$. În cazul în care sînt valabile inegalităţile (2.2), proporţionalitatea dintre curent şi tensiune nu poate fi respectată la orice timp $t$, deoarece curentul va trebui să fie cuprins între o curbă limită superioară

$$i_s = \frac{\int_{t_0}^{t} edt}{l_{\min}} = \left(\int_{t_0}^{t} edt\right) y_{\max} \tag{5.5}$$

şi o curbă limită inferioară:

$$i_i = \frac{\int_{t_0}^{t} edt}{l_{\max}} = \left(\int_{t_0}^{t} edt\right) y_{\min} \tag{5.6}$$

şi deoarece orice curbă $e = \rho\, i$, intersectează curbele $i_s$ şi $i_i$.

Să presupunem că între momentul $t_0$ şi $t_1$ curentul urmăreşte curba $i_s$, între $t_1$ şi $t_2$ curentul este cuprins între $i_s$ şi $i_i$, iar între $t_2$ şi $t_0 + T$, curentul urmăreşte curba $i_i$.

Dacă în inegalitatea (5.4) se fac substituţiile de mai sus, dar în locul limitelor $x_1$ şi $x_2$ se iau timpurile $t_1$ şi $t_2$, se găseşte:

$$\pi \leqslant \varepsilon \cdot \eta, \tag{5.7}$$

unde s-a notat

$$\frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} eidt = \pi,$$

$$\frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} edt = \varepsilon^2,$$

$$\frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} idt = \eta^2. \tag{5.8}$$

Factorul de putere se poate scrie

$$K = \frac{P + \pi}{\sqrt{E^2 + \varepsilon^2}\sqrt{I^2 + \eta^2}} \tag{5.9}$$

unde s-a notat

$$P = \frac{1}{T}\left(\int_{t_0}^{t_1} eidt + \int_{t_2}^{t_0+T} eidt\right),$$

$$E = \frac{1}{T}\left(\int_{t_0}^{t_1} edt + \int_{t_2}^{t_0+T} e^2dt\right),$$

$$I^2 = \frac{1}{T}\left(\int_{t_0}^{t_1} i^2dt + \int_{t_2}^{t_0+T} i^2dt\right), \tag{5.10}$$

Ţinînd seama de inegalitatea (5.7) se găseşte

$$K \leqslant \frac{P + \varepsilon\eta}{\sqrt{E^2 + \varepsilon^2}\sqrt{I^2 + \eta^2}}. \tag{5.11}$$

Inegalitatea (5.11) arată că factorul de putere este inferior unei limite care este atinsă cînd inegalitatea (5.7) este valabil semnul egal. Aceasta are însă loc cînd avem

$$e = \rho i \text{ pentru } t_1 \leqslant t \leqslant t_2. \tag{5.12}$$

În ipoteza că este îndeplinită relaţia (5.12), trebuie să existe relaţiile

$$\left(\int_{t_0}^{t_1} edt\right) y_{\max} = i(t_1) = \frac{1}{\rho}\, e(t_1)$$

$$\left(\int_{t_0}^{t_1} edt\right) y_{\min} = i(t_2) = \frac{1}{\rho}\, e(t_2) \tag{5.13}$$

ceea ce arată că $t_1$ şi $t_2$ nu pot fi aleşi arbitrari ci între ei există o relaţie.

Timpurile $t_1$ şi $t_2$ sînt perfect determinate cînd se dă $\rho$. Pentru a determina pe $\rho$ se observă că din (5.12) şi (5.8) rezultă

$$\varepsilon = \rho\eta \tag{5.14}$$

înlocuind $\eta$ din (5.14) în (5.11) se găseşte

$$K_{\max} = \frac{P + \frac{\varepsilon^2}{\rho}}{\sqrt{E^2 + \varepsilon^2}\sqrt{I^2 + \frac{\varepsilon^2}{\rho}}}. \tag{5.15}$$

Anulînd derivata expresiei (5.15) în raport cu $\rho$ se determină maximum maximorum al lui $K$. Se găseşte condiţia

$$\rho = \frac{P}{I^2} = \frac{P + \pi}{I^2 + \eta^2} = \frac{\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} eidt}{\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} i^2 dt}. \tag{5.16}$$

Substituind (5.14) şi (5.10) în (5.13) se determină $t_1$ şi $t_2$ printr-un sistem de două ecuaţii cu două necunoscute.

Pentru valoarea (5.16) a lui $\rho$ expresia (5.15) devine

$$K_{\max\,\max} = \sqrt{\frac{\varepsilon^2 + \frac{P^2}{I^2}}{E^2 + \varepsilon^2}} = \sqrt{\frac{\varepsilon^2 + P\rho}{E^2 + \varepsilon^2}}. \tag{5.17}$$

Este interesant de găsit expresia lui $K_{\max\,\max}$ în ipoteza că se cunosc timpurile $t_1$ şi $t_2$. Pentru aceasta vom calcula puterea transformată în lucru mecanic cu formula

$$P_u = \frac{1}{2T}\int_{t_1}^{t_2} i^2 \frac{dl}{dt} dt. \tag{5.18}$$

Integrala s-a efectuat între $t_1$ şi $t_2$, deoarece numai în acest interval de timp variază inductanţa. Din (5.2) rezultă că între $t_1$ şi $t_2$

$$\frac{dl}{dt} = \rho \frac{e^2 - \frac{de}{dt}\int_{t_0}^{t} edt}{e^2} \quad \text{pentru } t_1 \leqslant t \leqslant t_2. \tag{5.19}$$

Ţinînd seama şi de (5.12) se găseşte:

$$P_u = \frac{1}{2T\rho}\int_{t_1}^{t_2}\left[e^2 - \frac{de}{dt}\int_{t_0}^{t} edt\right] dt \tag{5.20}$$

şi după unele transformări

$$K_{\max\,\max} = \sqrt{\frac{\frac{1}{2T}\int_{t_1}^{t_2}\left[e^2 - \frac{de}{dt}\int_{t_0}^{t} edt\right] dt}{\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} e^2 dt}}. \tag{5.21}$$

Formulele (5.13) (ţinînd seama de (5.16) şi formula (5.21)) generalizează condiţiile de maxim stabilite anterior pentru o f.e.m. sinusoidală.

Ținînd seama de expresia (3.4) a lui $F$ se găsește

$$F_{\max\max} = \frac{\sqrt{\frac{1}{2T}\int_{t_1}^{t_2}\left[e^2 - \frac{de}{dt}\int_{t_0}^{t} edt\right]dt}}{\frac{1}{T}\left(\int_{t_0}^{t} edt\right)_{\max}}. \tag{5.22}$$

Formulele stabilite permit rezolvarea problemei propuse în cazul în care se dă o f.e.m. $e(t)$ oarecare.

În încheierea prezentului paragraf remarcăm că demonstrația dată mai sus pe baza inegalității (5.4) aparent nu are rigurozitatea demonstrației pe baza metodelor calculului variațional deoarece timpurile $t_1$ și $t_2$ sînt legate între ele. Dacă însă se iau două timpuri arbitrare $t_1'$ și $t_2'$ suficient de apropiate și se fixează curba lui $i$ pe restul perioadei $T$, atunci inegalitatea (5.11) rămîne valabilă, dacă în (5.10) integrarea se face după noua curbă a lui $i$, iar drept limite se iau $t_1'$ și $t_2'$. Rezultă astfel că pentru a avea $K$ maxim este necesar ca în orice regiune din interiorul domeniului de variație al lui $i$ să existe proporționalitate între tensiune și curent. Curbele care nu satisfac această condiție ies din discuție. Se ajunge astfel iarăși la examinarea familiei de curbe (5.12), restul demonstrației rămînînd neschimbat.

## 6. CAZUL CÎND SE DĂ FORMA INDUCTANȚEI ȘI SE CAUTĂ FORMA FORȚEI ELECTROMOTOARE

Am văzut la punctul 5 că atunci cînd se dă $e(t)$ rezultă o anumită formă, bine determinată pentru $y(t)$ (deci pentru $l(t)$).

Studiul de la punctul 5 este însă insuficient în ceea ce privește rezolvarea problemei inverse: a se găsi f.e.m. $e(t)$ optimă cînd se dă $y(t)$. Observăm în primul rînd că există o infinitate de forme de tensiune $e(t)$ pentru care forma optimă a lui $y(t)$ este aceeași. În adevăr, considerînd formulele (5.16), (5.10) și (5.13) din care rezultă timpurile $t_1$ și $t_2$ și formula (5,2) care dă $y(t)$ între timpurile $t_1$ și $t_2$ se vede că

*a*) între $t_1$ și $t_2$ f.e.m., $e(t)$, este determinată de relația (5.2), din care rezultă

$$\int_{t_0}^{t} edt = K\varepsilon^{\rho\int_{t_1}^{t} y(t)dt} \tag{6.1}$$

*b*) în afara limitelor $t_1$ și $t_2$ formula lui $e(t)$ este arbitrară cu condiția ca

$$\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} i^2 dt \text{ să fie constant} \tag{6.2}$$

Din condiția *b)* rezultă că $I^2 + \eta^2$ trebuie să fie constant (vezi (5.8) și (5.10)).

Pe lîngă condiţia (6.2) tensiunea $e(t)$ trebuie să mai satisfacă şi condiţia

$$\int_{t_0}^{t_1} e dt = \text{const.} \tag{6.3}$$

Toate aceste f.e.m. $e(t)$ pentru care forma optimă $y(t)$ este aceeaşi conduc la acelaşi factor $F_{\max\,\max}$ din (5.24). Se pune însă problema dacă nu se poate obţine un avantaj păstrînd constantă forma inductanţei şi modificînd forma tensiunii. Pentru a rezolva această problemă este indicat să se refacă studiul anterior pornind de la alte baze. Vom nota

$$\int_{t_0}^{t} e dt = \Phi(t). \tag{6.4}$$

Expresia (2.7) a curentului devine în acest caz

$$i = \Phi(t)\, y(t) = \frac{\Phi(t)}{l(t)}. \tag{6.5}$$

Totodată, expresia lui $F$ devine

$$F = \frac{\dfrac{1}{T}\displaystyle\int_{t_0}^{t_0+T} e i dt}{\dfrac{1}{T}\left(\displaystyle\int_{t_0}^{t} e dt\right)_{\max}\sqrt{\dfrac{1}{T}\displaystyle\int_{t_0}^{t_0+T} i^2 dt}} = \frac{\dfrac{1}{2T}\displaystyle\int_{t_0}^{t_0+T} \frac{\varphi^2}{l^2} l' dt}{\dfrac{1}{T}\sqrt{\dfrac{1}{T}\displaystyle\int_{t_0}^{t_0+T} \frac{\varphi}{l^2} dt}} \tag{6.6}$$

unde s-a notat cu $\varphi$ raportul $\Phi/\Phi_{\max}$, deci $\varphi \leqslant 1$.

Aplicînd metodele calculului variaţional vom da lui $\varphi$ o variaţie de forma

$$\varphi(t) + \alpha\lambda(t) \tag{6.7}$$

unde

$$\lambda(t_0) = \lambda(t_0 + T) = 0 \tag{6.8}$$

iar $\alpha$ este un parametru care tinde către zero. Introducînd această expresie în (6.6) se obţine

$$F(\varphi, \alpha) = \frac{\dfrac{1}{2}\displaystyle\int_{t_0}^{t_0+T} \frac{(\varphi + \alpha\lambda)}{l^2} l' dt}{\sqrt{\dfrac{1}{T}\displaystyle\int_{t_0}^{t_0+T} \frac{(\varphi + \alpha\lambda)^2}{l^2} dt}}. \tag{6.9}$$

Pentru ca, curba $\varphi(t)$ să corespundă maximului lui $F$ este necesar ca

$$F_\alpha(\varphi, 0) = 0 \tag{6.10}$$

deoarece $F(\varphi, 0) \neq 0$ condiția (6.10) este echivalentă cu condiția

$$\frac{d \ln F(\varphi, 0)}{d\alpha} = 0. \tag{6.11}$$

Introducînd (6.9) se găsește după unele transformări

$$\int_{t_0}^{t_0+T} \left[ \frac{\frac{1}{l^2} l' \varphi}{\frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_0+T} \frac{\varphi^2}{l^2} l' dt} - \frac{\frac{\varphi}{l^2}}{\int_{t_0}^{t_0+T} \frac{\varphi^2}{l^2} dt} \right] \lambda dt = 0. \tag{6.12}$$

Conform unei leme fundamentale din calculul variațional, pentru ca egalitatea (6.12) să fie satisfăcută indiferent de valoarea lui $\lambda$ este necesar și suficient ca:

$$\frac{\frac{l'}{l^2} \varphi}{A} - \frac{\frac{\varphi}{l^2}}{B} = 0 \tag{6.13}$$

unde

$$A = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_0+T} \frac{\varphi^2}{l^2} l' dt, \tag{6.14}$$

$$B = \int_{t_0}^{t_0+T} \frac{\varphi^2}{l^2} dt. \tag{6.15}$$

Definind $l'_{med}$ prin relația

$$l'_{med} = \frac{\int_{t_0}^{t_0+T} \frac{\varphi^2}{l^2} l' dt}{\int_{t_0}^{t_0+T} \frac{\varphi^2}{l^2} dt} \tag{6.16}$$

și introducînd în (6.13) se găsește că: expresia care înmulțește $\lambda dt$ în (6.13) este

$$\frac{\varphi}{l^2 \int_{t_1}^{t_2} \frac{\varphi^2}{l^2} dt} \left[ \frac{2l'}{l'_{med}} - 1 \right] \tag{6.17}$$

Pe baza celor de mai sus se pot stabili următoarele condiții de maxim

1) În intervalul în care

$$l' \leqslant \frac{l'_{med}}{2}, \tag{6.18}$$

unde $l'_{med}$ este definit de relația (6.16)

trebuie ca

$$\varphi = 0 \tag{6.19}$$

În adevăr, dacă $l' < \frac{l'_{med}}{2}$ expresia (6.17) este negativă, deci pentru ca $F'(\varphi, 0) > 0$ este necesar ca în (6.18) să avem: $\varphi\lambda < 0$. De aici rezultă (expresia 6.7) că dacă variaţia lui $\varphi$ este de semn contrar cu $\varphi$, atunci $F(t)$ creşte. Printr-o succesiune de variaţii ale lui $\varphi$ de semne contrarii cu $\varphi$ se obţine valoarea limită (6.19).

Pe de altă parte dacă

$$l' = \frac{1}{2} l'_{med}, \tag{6.20}$$

funcţia $\varphi$ nu este determinată. În paragraful 7 se ridică nedeterminarea obţinîndu-se şi în acest caz condiţia (6.19).

2) În intervalul în care

$$l' > \frac{1}{2} l'_{med} \tag{6.21}$$

funcţia $\varphi$ trebuie să fie egală cu valoarea sa maximă, deci:

$$\varphi = 1. \tag{6.22}$$

Demonstraţia se face ca şi la concluzia precedentă observînd că în acest caz este necesar să avem: $\varphi\lambda > 0$.

## 7. CALCULUL FACTORULUI $F$ ÎN CONDIŢIILE OPTIME

Presupunem în primul rînd că nu există decît un singur punct în care este satisfăcută relaţia (6.20). În acest caz, expresia (6.6) dă

$$F = \frac{\frac{1}{2T}\int_{t_0}^{t_0+T} \frac{\varphi^2}{l^2}\,dt}{\frac{1}{T}\sqrt{\frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} \frac{\varphi^2}{l^2}\,dt}}. \tag{7.1}$$

Notăm cu $t_1$ şi $t_2$ timpurile între care este satisfăcută inegalitatea (6.21) şi între care prin urmare este satisfăcută relaţia (6.22). Se obţine

$$F = \frac{1}{2} \frac{\frac{1}{l(t_1)} - \frac{1}{l(t_2)}}{\left(\frac{1}{l}\right)_{ef}} \tag{7.2}$$

unde

$$\left(\frac{1}{l}\right)_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2}\frac{1}{l^2}\,dt}. \tag{7.3}$$

Din expresia (7.2) rezultă că factorul $F$ poate crește la infinit, dacă se reduce $\left(\frac{1}{l}\right)_{ef}$ la zero, ceea ce s-ar obține cînd inductanța ar varia brusc.

Pe baza calculelor de mai sus, se poate ridica nedeterminarea care s-a semnalat în paragraful 6, privitor la relația (6.20). În acest caz dacă notăm cu $\tau_2$ domeniul în care este satisfăcută relația (6.20) și cu $\tau_1$, domeniul dintre timpurile $t_1$ și $t_2$ în care nu avem satisfăcută această relație și efectuăm calculele intermediare găsim

$$F = \frac{\frac{1}{2T}\int_{\tau_1}\left(\frac{1}{l}\right)' dt \sqrt{\int_{\tau_1}\frac{1}{l^2}\,dt + K}}{\frac{1}{T}\sqrt{\frac{1}{T}\left(\int_{\tau_1}\frac{1}{l^2}\,dt + \frac{1}{2}K\right)}} \tag{7.4}$$

unde

$$K = \int_{\tau_2}\frac{\varphi^2}{l^2}\,dt. \tag{7.5}$$

Se vede de aici că pentru ca $F$ să fie maxim, este necesar să avem $K = 0$, ceea ce atrage $\varphi = 0$ în întreaga regiune în care avem egalitatea (6.20).

Cu aceasta s-a justificat complet (6.18). Calculînd expresia (6.16) lui $l'_{med}$ și folosind condițiile

$$l'(t_1) = \frac{1}{2}\,l'_{med}, \tag{7.6}$$

$$l'(t_2) = \frac{1}{2}\,l'_{med}, \tag{7.7}$$

se pot determina timpurile $t_1$ și $t_2$ prin aproximații succesive.

## 8. COMPARAȚIE CU CAZUL ÎN CARE F.E.M. ESTE SINUSOIDALĂ

Anterior s-a stabilit forma optimă de inductanță care are loc în cazul unei tensiuni sinusoidale găsindu-se

$$l = L_0 \operatorname{tg}\omega t \quad \text{pentru} \quad \varphi \leqslant \omega t \leqslant \psi, \tag{8.1}$$

$$K = \sqrt{\frac{\psi - \varphi}{\pi}} \tag{8.2}$$

$\psi$ şi $\varphi$ fiind determinaţi de un sistem de ecuaţii transcendente. Valoarea factorului $F$ în acest caz (expresia 3.4) este

$$F_{\sin} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\pi (\psi - \varphi)}, \tag{8.3}$$

unde $\omega T = \pi$ deoarece $T$ este perioada mişcării, egală cu jumătate din perioada f.e.m. aplicate. Din (8.1) se găseşte

$$l' = L_0 \omega \frac{1}{\cos^2 \omega t}. \tag{8.4}$$

Pe de altă parte

$$\left(\frac{1}{l}\right)_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \frac{1}{L_0^2 \omega} \left[ -\frac{1}{\operatorname{tg} \omega t} - \omega t \right]_{t_1}^{t_2}}. \tag{8.5}$$

Valoarea lui $l'_{med}$ este

$$l'_{med} = L_0 \omega \frac{\frac{1}{\operatorname{tg} t_1} - \frac{1}{\operatorname{tg} \omega t_2}}{\left[ -\frac{1}{g\, \omega t} - \omega t \right]_{t_1}^{t_2}}. \tag{8.6}$$

Să presupunem că relaţia (6.23) este satisfăcută pentru unghiurile $\varphi$ şi $\psi$. În acest caz timpurile $t_1$ şi $t_2$ corespund la $\varphi$ şi $\psi$, iar factorul $F$, conform formulei (7.2) este egal cu

$$F = \frac{1}{2} \sqrt{\pi} \frac{\frac{1}{\operatorname{tg} \varphi} - \frac{1}{\operatorname{tg} \psi}}{\sqrt{\left[ -\frac{1}{\operatorname{tg} \omega t} - \omega t \right]_{\varphi}^{\psi}}}. \tag{8.7}$$

În cazul $L_{max}/L_{min} = 5$ avem: $\varphi \approx 50° = 0{,}872$ rad, iar $\psi = 80°\,25' = 1{,}39$ rad. Rezultă $l'_{med} = \frac{L_0 \omega}{0{,}23}$. Relaţia (6.23) este satisfăcută pentru $\omega t = \varphi$ deci cu atît mai mult va fi satisfăcută pentru $\omega t = \psi$. În consecinţă, timpurile $t_1$ şi $t_2$ corespund unghiurilor $\varphi$ şi $\psi$ de mai sus. Din expresia (8.3) rezultă că factorul $F$, cînd f.e.m., este sinusoidală este egal cu 0,91.

Pe de altă parte factorul $F$ cînd se păstrează aceeaşi formă de variaţie a inductanţei dar se modifică f.e.m., $e(t)$ este, conform expresiei (8,7), egal cu 1,54.

În consecinţă, modificînd forma lui $e(t)$ factorul $F$ poate creşte într-un raport limitat de valoarea 1,7.

## 9. CONCLUZII

După cum a rezultat din lucrarea de faţă, cele două puncte de vedere din care s-a efectuat calculul şi anume:

*a)* se dă forma f.e.m. şi se caută forma variaţiei inductanţei (problemă rezolvată în paragraful 5) şi

*b)* se dă forma inductanţei şi se caută forma f.e.m., aplicate (problemă rezolvată în paragrafele 6 şi 7), conduc la rezultate complet diferite, fapt care poate

să apară paradoxal la prima vedere. Problema în toată generalitatea ei, cînd se consideră variabilă atît forma inductanţei cît şi forma f.e.m., se rezolvă pe baza calculelor precedente în care s-a presupus pe rînd că inductanţa sau f.e.m., are o formă invariabilă, tot astfel cum maximul unei funcţii de două variabile se determină anulînd derivatele parţiale în raport cu fiecare variabilă, sau — ceea ce este echivalent — determinînd maximul funcţiei cînd se presupune pe rînd că fiecare dintre variabile este constantă. Soluţia problemei generale trebuie prin urmare să satisfacă simultan condiţiile stabilite în cele două cazuri studiate separat mai sus.

Aceasta conduce la inductanţe şi fluxuri de forma unor impulsuri foarte înguste. În acest caz, factorul $F$ ar fi infinit, dar, pe baza unui raţionament analog cu cel de la începutul punctului 5, se arată că energia optimă transmisă ar tinde către zero.

Dacă se pune problema de a obţine maximum de energie de la un circuit magnetic dat, este mai important cazul studiat la paragraful 6. Şi în acest caz rezultă că s-ar putea face $F$ infinit dacă $\left(\frac{1}{l}\right)_{ef}$ ar tinde către zero. (formula 7.2).

Pentru a determina energia maximă care se poate obţine de la un circuit magnetic dat, este util să se dea şi o altă formulare, mai fizică, a condiţiilor de maxim de la punctul 6, după cum urmează:

1) La o cursă dată trebuie să se absoarbă maximum de energie din cîmpul magnetic. Aceasta are loc cînd fluxul este constant şi egal cu valoarea maximă admisibilă din considerente de saturaţie.

2) Curentul eficace prin bobină trebuie să fie cît mai mic pentru a reduce la minimum secţiunea bobinei. Aceasta se realizează pe de o parte anulînd curentul în zona în care nu se absoarbe energie şi pe de altă parte făcînd ca pauza să dureze cît mai mult.

Faţă de formularea de mai sus, analiza exactă de la paragrafele 6 şi 7, dă în plus timpurile $t_1$ şi $t_2$ în funcţie de curba de variaţie a inductanţei.

Curentul eficace tinde către zero cînd pauza creşte.

În consecinţă, secţiunea bobinei tinde către zero şi produsul $S\,\$$ tinde către zero, totodată însă, cînd se dă $S$, raportul $S/\$$ creşte şi diferă de valoarea sa optimă, fapt care face ca greutatea pe energie să nu mai fie proporţională cu $\sqrt[4]{(S\,\$)^3}$ deci să nu tindă către zero. Limita către care tinde greutatea este determinată de energia care se poate înmagazina în cîmpul magnetic într-un volum dat — ţinînd seama de fenomenul de saturaţie. Practic însă, se va constata totdeauna o abatere importantă de la acest caz ideal deoarece inductanţa are un timp finit de variaţie şi pauza nu poate fi făcută prea mare din consideraţii de productivitate.

În încheiere, remarcăm că, forma dreptunghiulară a fluxului poate fi realizată în practică doar aproximativ, pe de o parte deoarece aceasta ar cere tensiuni aplicate în formă de impulsuri infinite şi pe de altă parte, chiar în ipoteza că s-ar realiza aceste tensiuni, deoarece s-ar naşte curenţi Foucault foarte intenşi (teoretic infiniţi) care prin însăşi apariţia lor ar reacţiona asupra fluxului provocînd o abatere de la forma dreptunghiulară. Trebuie de asemenea să se reexamineze în acest caz problema randamentului şi a transmisiei f.e.m., pe o linie.

# ОБ ОПТИМАЛЬНЫХ ФОРМАХ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ И ИНДУКТИВНОСТИ В МАШИНАХ С ПЕРЕМЕННОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

В некоторых предположениях, указанных в первых параграфах работы, определяется форма, которую должно было бы иметь изменение индуктивности во времени, а также приложенная э. д. с., для того чтобы вес машины был наименьшим. Задача разрешается в двух случаях: в случае когда электродвижущей силе дается произвольная форма и ищется оптимальная форма индуктивности, а также в случае, когда дается форма изменения индуктивности и определяется оптимальная форма приложенной э. д. с. При помощи численного примера устанавливается мера, в которой улучшаются условия работы вследствие применения этих результатов и в тоже время указывается на выявляющиеся при этом недочеты.

# SUR LES FORMES OPTIMA DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE ET DE L'INDUCTANCE DANS LES MACHINES À INDUCTANCE VARIABLE

(RÉSUMÉ)

Partant de certaines hypothèses, spécifiées dans les premiers paragraphes du travail, on détermine la forme que devrait prendre la variation de l'inductance avec le temps ainsi que la force électromotrice appliquée, pour que le poids de la machine soit minimum. Le problème est résolu dans les deux cas suivants: on part d'une forme, arbitrairement choisie, de la force électromotrice et l'on cherche la forme optimum de l'inductance, ou bien, on part de la forme de variation de l'inductance et l'on cherche la forme optimum de la force électromotrice appliquée. Un exemple numérique sert à déterminer dans quelle mesure l'application de ces résultats améliore les conditions de fonctionnement. En même temps, on signale les inconvénients de l'application de cette méthode.

STUDII ȘI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 1—2, 1956

# DETERMINAREA EXPRESIILOR CURENȚILOR CARE APAR ÎN ÎNFĂȘURĂRILE STATORULUI GENERATORULUI ÎN MOMENTUL CONECTĂRII ACESTUIA LA REȚEA PRIN METODA AUTOSINCRONIZĂRII

DE

V. N. NEDELCU

## CONSIDERAȚII GENERALE

În ultimul timp conectarea generatorilor și compensatorilor sincroni la funcționarea în paralel, prin metoda autosincronizării a devenit cea mai simplă și sigură metodă de conectare la toate centralele electrice din sistemele energetice din U.R.S.S., precum și la o serie de centrale din R.P.R.

Rezolvarea teoretică a diverselor probleme pe care le ridică practica industrială, sînt destul de complicate dată fiind complexitatea procesului fizic, ce se petrece în mașină din momentul conectării acesteia la rețea și pînă în momentul intrării mașinii respective în sincronism.

În lucrarea de față, plecîndu-se de la ecuațiile fundamentale ale mașinii sincrone idealizate Gorev-Park ([1], [2]) se dau expresiile curenților, care apar în înfășurările mașinii sincrone în momentul conectării acesteia la rețea în cazul cel mai general: mașina sincronă trifazată, cu poli aparenți și cu înfășurări de amortizare pe ambele axe. Din aceste expresii se pot deduce ușor expresiile curenților pentru cazurile particulare: mașina fără înfășurări de amortizare pe una din axe sau chiar pe amîndouă și pentru mașina cu poli înecați.

Alunecarea rotorului este considerată constantă.

### Aspectul fizic al problemei

În esență fenomenele electromagnetice, care se nasc în mașina sincronă în momentul conectării acesteia la rețea, la o anumită alunecare a rotorului, sînt de aceeași natură cu fenomenele funcționării asincrone a mașinii sincrone sau cu fenomenele, care apar în mașină în timpul oscilațiilor mari ale rotorului (amplitudinea oscilației egală cu $\pi$).

În legătură cu aceasta este necesar să se lămurească latura fizică a acestor procese electromagnetice.

Se va face următorul raționament:

*a)* Se imaginează că statorul unei mașini sincrone trifazate al cărei rotor în prealabil a fost scos, este alimentat cu o tensiune sinusoidală trifazată. În acest caz în înfășurările statorului vor circula curenți sinusoidali (forțați), iar în virtutea legii inerției cîmpului magnetic vor mai circula și curenți aperiodici, care se amortizează cu constanta de timp a acestei înfășurări.

*b)* Mai departe, același stator se alimentează cu o tensiune trifazată, însă de data aceasta rotorul mașinii este montat și se rotește cu o viteză unghiulară $(1 \pm s)\,\omega$, ($s$ = const.).

Datorită legăturii electromagnetice dintre înfășurările statorului și rotorului, procesul tranzitoriu în acest caz se va desfășura altfel în comparație cu același proces din cazul de mai sus.

Componenta aperiodică, care apare în înfășurarea statorului, creează în rotorul, care se învîrtește cu viteza unghiulară $(1 \pm s)\,\omega$, o f.e.m., de frecvență $(1 \pm s)\,\omega$ și prin urmare în circuitul rotoric apar curenți de aceeași frecvență.

În virtutea aceleași legi, legea inerției cîmpului magnetic, în înfășurările rotorului apare în primul moment o componentă aperiodică pentru ca să anuleze componenta periodică de frecvență $(1 \pm s)\,\omega$, care se amortizează cu constanta de timp a înfășurării de excitație $T'_d$.

Această componentă induce în stator o componentă tranzitorie de curent corespunzătoare de frecvență $(1 \pm s)\,\omega$, care în timp se stinge cu aceeași constantă de timp $T'_d$. La rîndul său, componenta periodică a curentului rotoric, se poate descompune după cunoscuta teoremă a cîmpurilor învîrtitoare în două f.m.m., ale căror amplitudini sînt egale și care se învîrtesc în direcții opuse cu viteza unghiulară $(1 \pm s)\,\omega$ în raport cu rotorul; vitezele absolute ale acestor componente (vitezele față de stator) sînt zero și $2\,(1 \pm s)\,\omega$.

Cîmpul f.m.m., care, față de stator, se învîrtește cu viteza unghiulară $2\,(1 + s)\,\omega$ induce în stator curenți de aceeași frecvență; f.m.m. creată de acești curenți avînd același sens de rotație ca și rotorul, induce în înfășurările acestuia curenți de frecvență $(1 \pm s)\,\omega$. De aici se poate trage concluzia, că componenta de frecvență $2\,(1 \pm s)\,\omega$ din stator este reflectata componentei aperiodice a curentului statoric față de rotor și deci se amortizează cu constanta de timp a statorului.

Componenta periodică forțată a curentului statoric are față de rotor viteza unghiulară $\pm s\,\omega$; prin urmare, această componentă induce în rotor curenți, a căror frecvență este egală cu viteza unghiulară $s\,\omega$.

Acești curenți pulsatorii de asemenea se pot descompune în cîte două componente de amplitudine constantă și care se învîrtesc în direcții opuse.

Vitezele absolute ale acestor componente sînt egale cu $\omega$, și $(1 \pm 2s)\,\omega$.

F.m.m. de frecvență $\omega$, induce în stator curenți care au frecvența $\omega$, iar cea de-a doua — curenți de frecvență $(1 \pm 2s)\,\omega$.

Acești curenți de frecvență $\omega$ și $(1 \pm 2s)\,\omega$ sînt curenți staționari ai funcționării asincrone. Din nou se poate remarca fenomenul de reflexie, de data aceasta a curentului staționar statoric, față de rotor, prin aceea că componenta statorică de frecvență $(1 \pm 2s)\,\omega$, induce în rotor curenți de frecvență $s\omega$, exact ca și componenta statorică de frecvență nominală.

Prin urmare, în momentul conectării la rețea a mașinii sincrone cu poli aparenți, cînd rotorul față de cîmpul statorului are o alunecare oarecare, în circuitele statorului apar, în afară de componenta aperiodică, și alte componente tranzitorii

periodice, a căror frecvență este egală cu viteza unghiulară a rotorului și respectiv cu dublul acestei viteze; în ceea ce privește componentele forțate, în afară de componenta de frecvență sincronă, apare și o componentă de frecvență $(1 \pm 2s)\,\omega$. Apariția tuturor componentelor examinate mai sus, conduce la asigurarea echilibrului electromagnetic în circuitele mașinii, deoarece în primul moment curenții în înfășurări trebuie să fie nuli.

## EXPRESIILE GENERALE OPERAȚIONALE ALE CURENȚILOR STATORULUI

Expresiile generale operaționale ale curenților statorului se pot găsi rezolvîndu-se sistemul de ecuații Gorev-Park. Aceste ecuații sînt

$$e_d = p\psi_d - \psi_q\, p\theta - ri_d, \tag{1}$$

$$e_q = p\psi_q + \psi_d\, p\theta - ri_q, \tag{2}$$

$$\psi_d = G(p)\, E_f - x_d(p)\, i_d, \tag{3}$$

$$\psi_q = -\, x_q(p)\, i_q, \tag{4}$$

unde

$e_d$, $e_q$ — imaginile tensiunilor la bornele înfășurărilor echivalente $d$, $q$;
$\psi_d$, $\psi_q$ — imaginile fluxurilor rezultate în aceleași înfășurări;
$i_d$, $i_q$ — imaginile curenților în înfășurările $d$, $q$;
$x_d(p)$, $x_q(p)$ — reactanțele operaționale longitudinale și transversale;
$G(p)$ — conductanța operațională a mașinii;
$r$ — rezistența statorului;
$\theta$ — unghiul mișcării absolute.

Pentru derivata unghiului mișcării absolute $(p\,\theta)$ se găsește expresia (figura)

$$p\theta = 1 + p\delta. \tag{5}$$

Dacă se introduc expresiile (3), (4) în (1), (2) și dacă se notează prin

$$Z_d(p) = r + px_d(p),$$

$$Z_q(p) = r + px_q(p)$$

pentru $i_d(p)$, $i_q(p)$ se obțin expresiile

$$i_d(p) = -\frac{Z_q(p)}{\Delta(p)}\, e_d - \frac{p\theta x_q(p)}{\Delta(p)}\, e_q + \{pZ_q(p) + p\theta^2 x_q(p)\}\, G(p)\, E_f/\Delta(p), \tag{6}$$

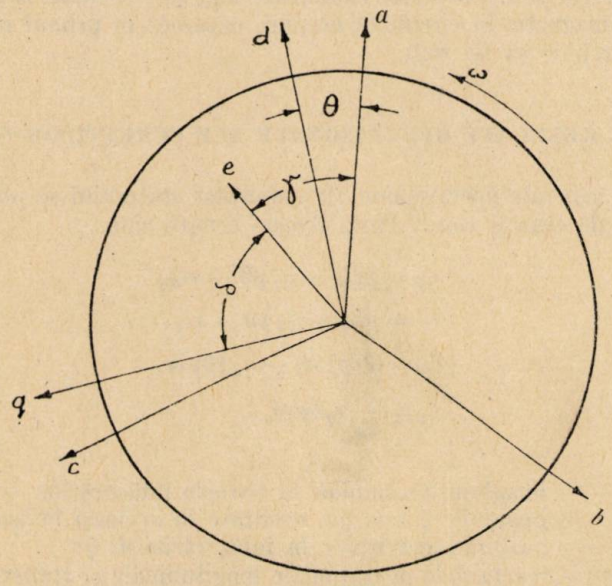
$$i_q(p) = -\frac{Z_d(p)}{\Delta(p)}\, e_q + \frac{p\theta x_d(p)\, e_d}{\Delta(p)} + \frac{rp\theta\, G(p)\, E_f}{\Delta(p)} \tag{7}$$

unde

$$\Delta(p) = Z_d(p) \cdot Z_q(p) + p\theta^2 x_d(p)\, x_q(p).$$

Deoarece rezolvarea acestor ecuații operaționale implică efectuarea unor operații matematice extrem de complicate, în majoritatea cazurilor se poate obține o simplificare substanțială dacă se neglijează rezistența statorului.

Această simplificare nu introduce în calcule erori cîtuşi de puţin însemnate, mai ales în cazul generatorilor care funcţionează paralel cu un sistem energetic prin intermediul liniilor de înaltă tensiune ($r \ll x$).




Schema maşinii sincrone trifazate idealizate.

Astfel, cînd $r = 0$

$$i_d(p) = -\frac{pe_d}{x_d(p)\,[p^2 + p\theta^2]} - \frac{p\theta e_q}{x_d(p)\,[p^2 + p\theta^2]} + \frac{G(p)\,E_f}{x_d(p)}, \tag{7'}$$

$$i_q(p) = -\frac{pe_q}{x_q(p)\,[p^2 + p\theta^2]} + \frac{p\theta e_d}{x_q(p)\,[p^2 + p\theta^2]}, \tag{8}$$

$$\Delta(p) = x_d(p)\,x_q(p)\,[p^2 + p\theta^2].$$

Formulele operaţionale ale curenţilor sînt generale; prezenţa sau absenţa înfăşurărilor de amortizare se resfrînge asupra reactanţelor operaţionale.

Mărimile $i_d(p)$, $i_q(p)$ se numesc imagini ale mărimilor $i_d(t)$, $i_q(t)$.

Pentru a se găsi originalele acestor imagini, se pot folosi diverse metode ale calculului operaţional.

În cazul cînd se respectă condiţia Heaviside, se poate aplica teorema descompunerii dacă imaginile au forma unor fracţiuni raţionale algebrice.

Referitor la variaţia vitezei rotorului sau a alunecării, trebuie subliniat faptul că în regimuri tranzitorii aceste mărimi variază după legi foarte complicate. Cînd constanta de inerţie a maselor în mişcare are o valoare mare, atunci legea de variaţie a acestor mărimi se simplifică datorită amortizării armonicelor superioare ale oscilaţiilor mecanice de către rotor. O rezolvare teoretică mai generală a problemelor funcţionării în regim tranzitoriu a maşinii sincrone, se poate obţine, făcîndu-se presupunerea că viteza sau alunecarea rămîn constante în perioada de timp studiată.

## DETERMINAREA ORIGINALELOR CURENȚILOR STATORICI

Expresiile imaginilor curenților care apar în stator în momentul conectării acestuia la rețea, sînt date prin ecuațiile (7′) și (8).

Cînd statorul mașinii sincrone se conectează la un sistem trifazat simetric de tensiuni pentru $e_d$, $e_q$ se obțin următoarele expresii (transformarea Blondel)

$$e_d = e \sin \delta = e \sin (\delta_0 \pm st), \tag{9}$$

$$e_q = e \cos \delta = e \cos (\delta_0 \pm st), \tag{10}$$

unde

$e$ — tensiunea pe fază,

$s$ — alunecarea rotorului.

Imaginile acestor mărimi în sensul Laplace se obțin după formula

$$\mathfrak{L} f(t) (=) \int_0^{\infty} f(t)\, \varepsilon^{-pt}\, dt (=) \lim_{\substack{T\to\infty \\ \varepsilon\to 0}} \int_{\varepsilon}^{T} f(t)\, \varepsilon^{-pt}\, dt \tag{11}$$

Astfel, pentru $s > 0$:

$$\mathfrak{L}\, e_d (=) \frac{e (p \sin \delta_0 - s \cos \delta_0)}{p^2 + s^2}, \tag{12}$$

$$\mathfrak{L}\, e_q (=) \frac{e (p \cos \delta_0 + s \sin \delta_0)}{p^2 + s^2}. \tag{13}$$

Înlocuind în ecuațiile (7, (8) pe $x_d(p)$, $x_q(p)$ $G(p)$ cu valorile lor [3]

$$x_d(p) = x_d \frac{1 + p(T_d' + T_c') + p^2 T_d'' T_d'}{1 + p(T_f + T_c) + p^2 T_f T_{d0}''} \tag{14}$$

$$x_q(p) = x_q \frac{1 + pT_q'}{1 + pT_q}, \tag{15}$$

$$G(p) = \frac{1 + pT_c \sigma_c}{1 + p(T_f + T_c) + p^2 T_f T_{d0}} \cdot \frac{x_M}{r_f} \tag{16}$$

și de asemenea introducînd expresiile (12), (13), se obțin ecuațiile operaționale desfășurate ale curenților $i_d$, $i_q$

$$i_d(p) = -\frac{e}{x_d} \frac{p(p \sin \delta_0 - s \cos \delta_0)\,[T_{d0}'' T_f p^2 + p(T_f + T_c) + 1]}{(p^2 + s^2)\,[p^2 + (1-s)^2]\,[T_d'' T_d' p^2 + p(T_d' + T_c') + 1]} -$$

$$- \frac{e}{x_d} \frac{(1-s)(p \cos \delta_0 + s \sin \delta_0)\,[T_{d0}'' T_f p^2 + p(T_f + T_c) + 1]}{(p^2 + s^2)\,[p^2 + (1-s)^2]\,[T_d'' T_d' p^2 + (T_d' + T_c') p + 1]} +$$

$$+ \frac{E_f}{x_d} \frac{1 + p T_c \sigma_c}{[1 + p(T_d' + T_c') + p^2 T_d' T_d'']} \cdot \frac{x_M}{r_f}, \tag{17}$$

$$i_1(p) = -\frac{e}{x_q} \frac{p(p \cos \delta_0 + s \sin \delta_0)(T_q p + 1)}{(p^2 + s^2)\,[p^2 + (1-s)^2]\,(T_q' p + 1)} +$$

$$+ \frac{e}{x_q} \frac{(1-s)(p \sin \delta_0 - s \cos \delta_0)(T_q p + 1)}{(p^2 + s^2)\,[p^2 + (1-s)^2](T_q' p + 1)}. \tag{18}$$

Rezolvarea acestor ecuații diferențiale se poate efectua rezolvînd în parte fiecare membru, deoarece în cazul mașinii idealizate saturația se neglijează.

Este indicat să se determine separat ecuația componentei curentului statoric, care este condiționată de aplicarea tensiunii $e\,[i_{1d}(t)]$, și a componentei condiționată de tensiunea $E_f\,[i_{2d}(t)]$, avîndu-se în vedere faptul, că în practică conectarea tensiunii $e$ (a rețelei) nu coincide în timp cu aplicarea tensiunii $E_f$. Din punctul de vedere al rezolvării ecuațiilor diferențiale, expresiile componentelor curentului statoric, care respectiv sînt condiționate de $e$ sau $E_f$, rămîn neschimbate, dacă aceste tensiuni se aplică în același moment sau în momente diferite.

În asemenea cazuri numai curentul rezultant se schimbă.

Deoarece mărimile $i_d(p)$, $i_q(p)$ sînt reprezentate prin fracții algebrice raționale, pentru determinarea originalelor acestor mărimi, se poate aplica transformarea inversă a lui Laplace în forma teoremii descompunerii.

Astfel

$$i_{1d}(t) = \mathfrak{L}^{-1}\, i_{1d}(p) = -\frac{e}{x_d}\sum_{k=1}^{k=n}\frac{A_1(p_k)\,\varepsilon^{p_k t}}{B_1'(p_k)} - \frac{e}{x_d}\sum_{k=1}^{k=n}\frac{A_2(p_k)\,\varepsilon^{p_k t}}{B_1'(p_k)} \tag{19}$$

unde

$p_k$ — rădăcinile ecuației $B_1(p) = 0$

$$\begin{aligned}
A_1(p) &= p\,(p\sin\delta_0 - s\cos\delta_0)\,[T''_{d0}\,T_f\,p^2 + p\,(T_f + T_c) + 1]\\
B_1(p) &= (p^2 + s^2)\,[p^2 + (1-s)^2]\,[T'_d\,T''_d\,p^2 + p\,(T'_d + T_c) + 1]\\
A_2(p) &= (1-s)\,(p\cos\delta_0 + s\sin\delta_0)\,[T''_{d0}\,T_f\,p^2 + p\,(T_f + T_c) + 1].
\end{aligned} \tag{20}$$

Din ecuația $B_1(p) = 0$, se determină următoarele rădăcini

$$p_{1,2} = \pm js\ ;\ p_{3,4} = \pm j\,(1-s);$$

$$p_{5,6} = \left[-(T'_d + T'_c) \pm \sqrt{(T'_d + T'_c)^2 - 4T'_d\,T''_d}\right]/2T'_d\,T''_d. \tag{21}$$

În cazul cînd rezistența înfășurării de amortizare $r_c$ este foarte mare în raport cu rezistența înfășurării de excitație $r_f$ ($r_c \gg r_f$), la determinarea rădăcinilor $p_{5,6}$, se poate face presupunerea, că rezistența $r_c$ în raport cu $r_f$ este infinit de mare ($r_c = \infty$), iar rezistența $r_f$, la rîndul său, față de $r_c$ este foarte mică, adică $r_f = 0$.

Aceste presupuneri permit să se afle soluții mult mai generale ale ecuației curentului. Astfel

$$\begin{aligned}
&\text{cînd } r_c = \infty \quad ;\ p_5 = -1/T'_d,\\
&\text{cînd } r_f = 0 \quad ;\ p_6 = -1/T''_d,
\end{aligned} \tag{22}$$

iar expresia $x_d(p)$ corespunzător se transformă

$$\left.\begin{aligned}
[x_d(p)]_{r_c=\infty} &= x_d\,(1 + p\,T'_d)/(1 + pT_f)\\
[x_d(p)]_{r_f=0} &= x'_d\,(1 + pT''_d)/(1 + pT''_{d0}).
\end{aligned}\right\} \tag{23}$$

Cînd această presupunere nu este acceptabilă, valorile $p_{5,6}$ se vor determina cu ajutorul formulei exacte (21).

Rădăcinile imaginare ale ecuației caracteristice definesc componentele periodice ale curentului statoric, iar cele reale definesc componentele aperiodice al căror factor de amortizare este egal cu rădăcina respectivă a ecuației caracteristice.

Aplicîndu-se formula (19) sau alte forme ale acesteia pentru cazul rădăcinilor imaginare și conjugate, se obțin următoarele expresii pentru componentele longitudinală și transversală ale curentului statorului

$$i_{1d}(t) = -\frac{e}{x_d}\left[\frac{(1-s^2\,T_f T''_{d0})^2 + s^2\,(T_f + T_c)^2}{(1-s^2\,T'_d T''_d)^2 + s^2\,(T'_d + T'_c)^2}\right]^{1/2} \cos\,(\delta_0 - st - \psi_{sd}) +$$

$$+ e\,(1/x''_d - 1/x'_d)\,\frac{T''_d\,\varepsilon^{-t/T''_d}}{[1+s^2\,T''^2_d]^{1/2}[1+(1-s)^2\,T''^2_d]^{1/2}} \sin[\delta_0 + \varphi''_{sd} - \varphi''_{(1-s)d}] +$$

$$+ e\,(1/x'_d - 1/x_d)\,\frac{T'_d\,\varepsilon^{-t/T'_d}}{[1+s^2\,T'^2_d]^{1/2}\,[1+(1-s)^2\,T'^2_d]^{1/2}} \sin[\delta_0 + \varphi'_{sd} - \varphi'_{(1-s)d}] +$$

$$+ \frac{e}{x_d}\left[\frac{[1-(1-s)^2 T_f T''_{d0}]^2 + (1-s)^2\,(T_f + T_s)^2}{[1-(1-s)^2 T'_d T''_d]^2 + (1-s)^2\,(T'_d + T'_c)^2}\right]^{1/2} \cdot \varepsilon^{-t/T_a} \cos[\delta_0 + (1-s)\,t + \psi_{(1-s)d}], \quad (24)$$

$$i_{1q}(t) = \frac{e}{x_q}\left[\frac{1+s^2 T_q^2}{1+s^2 T'^2_q}\right]^{1/2} \sin\,(\delta_0 - st - \psi_{sq}) -$$

$$- \frac{e}{x_q}\left[\frac{1+(1-s)^2\,T_q^2}{1+(1-s)^2\,T'^2_q}\right]^{1/2} \varepsilon^{-t/T_a} \sin\,[\delta_0 + (1-s)\,t + \psi_{(1-s)q}] +$$

$$+ e\,(1/x'_q - 1/x)\,\frac{T'_q\,\varepsilon^{-t/T'_q}}{(1+s^2\,T'^2_q)^{1/2}[1+(1-s)^2\,T'^2_q]^{1/2}} \cos\,[\delta_0 + \varphi'_{qs} - \varphi'_{q(1-s)}], \quad (25)$$

unde

$T_f$, $T'_d$ — constantele de timp ale înfășurării de excitație cînd celelalte înfășurări sînt deschise ($T_f$) și cînd înfășurarea statorului este închisă ($T'_d$).

$T_c$, $T'_c$, $T''_{d0}$, $T''_d$ — constantele de timp ale înfășurării de amortizare longitudinală, cînd toate celelalte înfășurări sînt deschise ($T_c$); numai înfășurarea statorului închisă; numai înfășurarea de excitație închisă ($T''_{d0}$); toate celelalte înfășurări închise.

$T_a$ — constanta de timp a înfășurării statorice.

$x_d$, $x_q$ — reactanțele sincrone longitudinală și transversală.

$\sigma_c$ — coeficientul propriu de scăpări al înfășurării de amortizare ($d$).

$x_M$ — reactanța mutuală dintre înfășurarea statorului și celelalte înfășurări.

$r_f$ — rezistența înfășurării de excitație.

$x''_d$, $x'_d$ — reactanțele subtranzitorie și tranzitorie ale mașinii.

$$\psi_{sd} = \varphi_{sd} - \varphi'_{sd}\;;\; \varphi_{sd} = \operatorname{arctg}\frac{s\,(T_f + T_c)}{1 - s^2\,T_f T''_{d0}}\;;\; \varphi'_{sd} = \operatorname{arctg}\frac{s\,(T'_d + T'_c)}{1 - s^2\,T'_d T''_d},$$

$$\psi_{(1-s)d} = \varphi_{(1-s)d} - \varphi'_{(1-s)d}\;;\; \varphi_{(1-s)d} = \operatorname{arctg}\frac{(1-s)\,(T_f + T_c)}{1 - (1-s)^2\,T_f T''_{d0}}\;;$$

$$\varphi'_{(1-s)d} = \operatorname{arctg}\frac{(1-s)\,(T'_d + T'_c)}{1 - (1-s)^2 T'_d T''_d},$$

$$\psi_{sq} = \varphi_{sq} - \varphi'_{sq}\;;\; \varphi_{s_2} = \operatorname{arctg}(sT_q)\;;\; \varphi'_{sq} = \operatorname{arctg}\,(sT'_q),$$

$$\psi_{(1-s)q} = \varphi_{(1-s)q} - \varphi'_{(1-s)q}\;;\; \varphi_{(1-s)q}\,[(1-s)\,T_q]\;;\; \varphi'_{(1-s)q} = \operatorname{arctg}\,[(1-s)\,T'_q],$$

$$\varphi''_{sd} = \operatorname{arctg}\,(sT''_d)\;;\; \varphi''_{(1-s)d} = \operatorname{arctg}\,[(1-s)\,T''_d].$$

Din formula (24) se vede că $i_{1d}(t)$ constă din următoarele componente: componenta de frecvență $s\,\omega$, componenta de frecvență $(1-s)\,\omega$, două componente aperiodice.

Deoarece rotorul în spațiu se învîrtește cu viteza unghiulară $(1-s)\,\omega$, atunci componenta de frecvență $(1-s)\,\omega$ în sistemul $d, q, 0$, este nemișcată în spațiu, iar componenta aperiodică se învîrtește cu aceeași viteză unghiulară ca și rotorul.

Presupunerea făcută anterior, referitoare la rezistența statorului ($r = 0$) a condus la rezultatul că din examinarea teoretică, componenta tranzitorie aperiodică a curentului statoric (care în sistemul $d, q, 0$ se învîrtește cu viteza unghiulară $(1-s)\,\omega$) nu se amortizează; în realitate această componentă se amortizează cu constanta de timp a înfășurării statorului.

Din aceste formule se deduc ușor expresiile aceloraşi curenți în cazul mașinii sincrone fără înfășurări de amortizare și al mașinii cu poli înecați, care coincid cu formulele ce se întîlnesc în literatură pentru aceste cazuri [4].

Astfel pentru mașina sincronă fără înfășurări de amortizare se poate impune condiția: $r_{1d} = r_{1q} = \infty$ (rezistențele înfășurărilor de amortizare pe cele două axe sînt infinit de mari); iar pentru mașina cu poli înecați: $x_d = x_q$.

Avîndu-se expresiile componentelor curentului statoric $i_d(t)$, $i_q(t)$ se pot determina expresiile curenților $i_a$, $i_b$, $i_c$ după următoarele formule

$$\begin{aligned} i_a &= i_d \cos\theta - i_q \sin\theta + i_0 \\ i_b &= i_d \cos(\theta - 120) - i_q \sin(\theta - 120) + i_0 \\ i_c &= i_d \cos(\theta + 120) - i_q \sin(\theta + 120) + i_0 . \end{aligned} \tag{26}$$

După efectuarea înlocuirilor și a transformărilor matematice necesare, examinîndu-se expresiile curenților $i_a$, $i_b$, $i_c$ se pot distinge următoarele componente: componenta de frecvență sincronă, componenta de frecvență $(1-2s)$, $2(1-s)$ și componenta aperiodică, ceea ce corespunde în întregime fizicii procesului analizat.

Pentru calculele practice este mai comod să se determine în primul rînd valorile numerice ale curenților $i_d$, $i_q$ și apoi să se calculeze curenții $i_a$, $i_b$ și $i_c$.

După cum rezultă din formula (17), aplicarea tensiunii excitației, sau în general orice variație a acestei mărimi, afectează numai componenta longitudinală a curentului statoric.

Expresia operațională a curentului $i_{2d}(p)$, fiind dată sub forma unei fracții algebrice raționale, poate fi rezolvată în același mod ca și expresia curentului $i_{1d}(p)$.

Soluții mai generale se pot obține în cazul, cînd de asemenea, se poate face presupunerea: $r_e \gg r_f$.

În caz contrar, ecuația se poate rezolva exact pentru fiecare caz în parte folosindu-se valorile numerice ale parametrilor respectivi.

Pentru mașina fără înfășurări de amortizare pe axa longitudinală, expresia curentului $i_{2d}(t)$ este

$$i_{2d}(t) = \frac{E_d}{x_d}\left(1 - \varepsilon^{-t/T'_d}\right) \tag{27}$$

unde

$E_d$ — tensiunea indusă în înfășurarea statorului de către curentul nominal din bobina de excitație.

## ВЫРАЖЕНИЯ ТОКОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В ОБМОТКАХ СТАТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА В МОМЕНТ ВКЛЮЧЕНИЯ ЕГО В СЕТЬ СПОСОБОМ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

В настоящей работе автор, исходя из общих уравнений синхронной машины Парка-Горева, определяет выражения токов, возникающих в обмотках статора синхронного генератора в момент включения его в сеть, способом самосинхронизации в самом общем случае: синхронного генератора с явными полюсами и с успокоительными обмотками по поперечной и продольной осям.

Работа представляет собой часть кандидатской диссертации, защищенной автором в апреле 1955 г. в Московском энергетическом институте имени Молотова.

### ОБЪЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

Схема идеализированной трехфазной синхронной машины.

## EXPRESSIONS DES COURANTS QUI APPARAISSENT DANS LES ENROULEMENTS DU STATOR DU GÉNÉRATEUR SYNCHRONE, AU MOMENT DE SA CONNEXION AU RÉSEAU, PAR LA MÉTHODE DE LA SELF-SYNCHRONISATION

(RÉSUMÉ)

A partir des équations générales de Parik-Gorev de la machine synchrone, l'Auteur détermine les expressions générales des courants qui apparaissent lors de l'enroulement du stator du générateur synchrone, au moment de sa connexion au réseau par la méthode de self-synchronisation dans le cas le plus général: le générateur synchrone, à pôles saillants, à enroulements d'amortissement sur l'axe transversal et longitudinal.

Ce travail représente une partie de la thèse de doctorat soutenue par l'Auteur, en avril 1955, à l'Institut d'Energétique « Molotov » de Moscou.

### EXPLICATION DE LA FIGURE

Schéma de la machine synchrone triphasée idéalisée.

### BIBLIOGRAFIE

1. R. H. Park, *Definition of an Ideal S.M.*, GER, 1928, vol. 31, p. 332.
2. — *Two Reaction Theories of S.M.* Part. I TAIEE, 1929, vol. 48, p. 716; part. II, 1933, vol. 52, p. 352.
3. E. I. Kazovski, *Obobscenîi analiz perehodnîh proțesov b asinhronnîh i sinhronnîh mașinah.* Sbornik Electrosila, 1947, nr. 2—3.

4. V. A. Venikov i L. A. Jukov, *Perehodnîe proţesî electriceskih sistemah*. GEI, Moscova-Leningrad, 1953.
5. M. L. Waring a. S. B. Crary, *The Operational Impedances of a S.M.*, GER, 1932, vol. 35, nr. 11.
6. R. A. Lüter, *Operatornîe reactanti sinhronoi maşinî*, Electricestvo, 1934, nr. 17.
7. — *Teoria perehodnîx rejimov sinhronnîh maşin s primeneniem operatornovo iscislenia*, Leningrad, 1939.
8. C. Concordia, *Synchronous Machines*. New York-Londra, 1951.

# ASUPRA EXPERIENȚELOR DE ARDERE A LIGNIȚILOR DIN R.P.R. ÎN R. D. GERMANĂ

DE

D. BUIMOVICI

O dată cu exploatarea intensivă a zăcămintelor de lignit a apărut și problema stabilirii instalației adecvate pentru arderea acestora. Preocupările s-au îndreptat în două direcții: instalații mari, energetice, în care arderea lignitului are loc după prealabila sa măcinare, și instalații mijlocii și mici, unde arderea lignitului are loc pe grătar. Eforturile depuse în această din urmă direcție nu au dus la rezultatele scontate. Arderea pe grătarele construite a decurs în mod nefavorabil, neeconomic, cu indici de funcționare coborîți.

Secția de termoenergetică a Institutului de energetică are înscrisă în tematica sa de mai mulți ani problema stabilirii tipului optim de grătar pentru arderea lignitilor din R.P.R. În acest scop a fost construit un focar experimental pentru studiul amănunțit al arderii, care însă, dintr-o serie de motive, nici pînă la sfîrșitul anului 1955 nu a intrat în funcțiune. Pentru a răspunde cît mai repede cerințelor mereu crescînde ale industriei, în cadrul secției s-a efectuat o analiză teoretică a tipurilor existente de grătare, în funcție de aplicabilitatea lor pentru arderea lignitilor romînești. Rezultatele acestei analize au fost publicate în revista « Energetica și hidrotehnica » *), din care cităm: « În concluzie și din punctul de vedere al arderii stabile și economice, și din punctul de vedere al unor cheltuieli de construcții și exploatare reduse, grătarul cu împingere răsturnată poate fi recomandat în prezent ca soluția optimă pentru arderea în strat a lignitilor din R.P.R. ».

În R.P.R. nu a existat posibilitatea experimentării unui astfel de grătar. Urmînd exemplul R. P. Bulgare, și R. P. Ungare, care în situații similare au experimentat arderea cărbunilor indigeni pe instalații aflate în străinătate, Institutul de energetică a propus în fișele de colaborare tehnico-științifică pe anul 1955 efectuarea experiențelor în R. D. Germană.

Experiențele au avut loc între 19 și 22 decembrie 1955 în orașul Halle an der Saale, la centrala de încălzire a gării orașului. Cele două cazane ale centralei sînt identice, fiind echipate cu grătare tip Martin, montate în 1942.

Pentru efectuarea experiențelor au fost expediate în R.D.G. 5 vagoane cu lignit de Filipești de Pădure. Vagoanele au fost încărcate în mare măsură cu blocuri mari de lignit (în medie $500 \times 300 \times 200$). Din lipsa unui concasor blocurile de lignit au fost sparte cu ciocanul, obținîndu-se în felul acesta bucăți de dimensiuni mari, de peste 100 mm. Această granulație a avut o influență defavorabilă asupra arderii.

*) 1954, nr. 5—6.

Grătarul experimentat este mult prea scurt (2,75 m), lungimea activă a grătarului fiind şi mai redusă (2,40 m). Lăţimea este de 1,25 m. Rezultă deci: suprafaţa grătarului 3,44 m²; suprafaţa activă 3 m². Grătarul este compus din 9 bare, din care 4 sînt mobile. Acţionarea barelor mobile, cît şi a sistemului de alimentare cu cărbune, este realizată hidraulic, prin pompă de ulei şi motoarele respective. Unghiul de înclinare al grătarului este deosebit de mare, de 22°. Această situaţie s-a reflectat de asemenea nefavorabil asupra arderii lignitului.

Profilarea camerei de ardere este cu totul insuficientă în ceea ce priveşte repartizarea bolţilor. Aerul este insuflat sub grătar prin 5 zone, cu debitele reglabile pe zone. Presiunea maximă a aerului — 45 mm col. $H_2O$. Cazanul nu este prevăzut cu preîncălzitor de aer.

O expunere completă a instalaţiei, a tehnicii măsurătorilor, a desfăşurării experienţelor, a calculelor şi interpretării rezultatelor va fi făcută ulterior. Prezenta expunere are scopul de a da o informare generală asupra lucrării efectuate şi de a insista asupra rezultatelor deosebit de bune ce s-au obţinut.

Încercările de ardere ale ligniţilor romîneşti pe grătarul Martin au rezolvat în mare măsură trei dintre cele mai importante dificultăţi: comportarea zgurii pe grătar, aprindere rapidă şi stabilă, încărcări termice mari ale grătarului.

Funcţionarea grătarelor existente în prezent în R.P.R. a întîmpinat cele mai mari greutăţi datorită comportării zgurii ligniţilor romîneşti. Avînd temperaturi coborîte de înmuiere şi fuziune, zgura acoperă grătarul. Grătarele existente nu rezolvă această situaţie, nu sînt în stare să distrugă covorul de zgură şi s-o evacueze în bunkărul respectiv. De aceea fochiştii sînt nevoiţi ca de mai multe ori pe oră să deschidă uşile cu răngile de fier, să spargă blocurile de zgură şi să le împingă de partea posterioară a grătarului. Nu mai insistăm asupra neajunsurilor ce decurg din această situaţie, atît din punctul de vedere al coborîrii randamentului arderii, cît şi din punctul de vedere al condiţiilor de muncă.

În timpul celor 47 de ore de funcţionare a grătarului Martin cu lignit din R.P.R. nu a fost necesară nici măcar o singură dată intervenţia fochistului pentru a degaja de zgură grătarul. Fenomene de zgurificare nu au apărut nici în cadrul ultimei probe, care a durat 30 de ore.

În timpul primei probe s-a putut observa formarea de blocuri de zgură, de circa 300 mm latură maximă, care totuşi, doar prin funcţionarea grătarului, erau transportate şi aruncate în bunkărul de zgură. În timpul acestei prime probe viteza barelor de grătar era redusă; o cursă completă a barelor dura 40 de secunde. Reducînd acest timp la jumătate (circa 20 secunde), în cadrul probelor ulterioare nu s-a mai observat formarea blocurilor de zgură pe grătar. Zgura cădea în formă granulată. S-a putut face astfel o constatare foarte importantă: comportarea zgurii pe grătar depinde direct de viteza barelor.

Deşi este un combustibil tînăr, cu grad ridicat de reactivitate, lignitul se aprinde greu, din cauza marelui conţinut de balast. De aceea, la grătarele deja construite, aprinderea (care era cauzată de radiaţia bolţilor şi a gazelor — aşa-numita aprindere superioară) s-a dovedit întotdeauna insuficientă. Grătarul Martin prezintă avantajul unei duble aprinderi, superioare şi inferioare. Cea din urmă constă din împingerea unei părţi din zgura şi cărbunele aflate în stare incandescentă la sfîrşitul grătarului către partea anterioară. În felul acesta cărbunele proaspăt introdus suferă de la început acţiunea termică a bolţilor şi gazelor (aprinderea superioară) şi acţiunea termică a masei incandescente, transportată de către grătar pe sub stratul de cărbune (aprinderea inferioară).

Experienţele efectuate au confirmat aceste supoziţii. Aprinderea lignitului a avut loc constant şi stabil, flăcările apărînd cam la 80 cm depărtare de capul grătarului. Cea de a doua dificultate a arderii în strat a ligniţilor a fost astfel rezolvată, asigurîndu-se aprindere constantă. Cercetările trebuie să fie îndreptate pentru intensificarea aprinderii superioare, prin profilarea corespunzătoare a camerei de ardere.

Performanţele realizate în timpul încercărilor sînt demne de relevat, ţinînd seama că a fost ars un combustibil inferior pe un grătar care în dimensiunile sale constructive nu cores-

pundea arderii lignitului. Tabloul complet pe date va fi comunicat ulterior. Menționăm deocamdată cîteva valori orientative:

— încărcare termică a grătarului 1 300 000—1 600 000 kcal/m²h,
— producție specifică de abur 1 200—1 400 kg abur/m²h,
— producție medie de abur — 4 tone/h,
— producție maximă de abur — 5,2 tone/h,
— parametri aburului: 12 ata; 240°C.

În concluzie, încercările efectuate au arătat în mod concludent că grătarul cu împingere răsturnată, sistem Martin, rezolvă în mod cu totul satisfăcător dificultățile ce apar la arderea ligniților, care la alte tipuri de grătar nu au putut fi înlăturate. O confirmare a acestei afirmații o constituie o serie de experiențe, efectuate tot în R.D.G. cu același lignit de Filipești de Pădure.

Grătarul era de tipul cu împingere superioară, fiind grătarul tip al fabricii constructoare « Mitteldeutsche Feuerungsbau » — Leipzig. Încercările au arătat următoarele: zgurificare intensă a grătarului, ceea ce necesita intervenția fochistului de 3—4 ori pe oră pentru spargerea covorului de zgură; performanțe de sarcină foarte reduse; aprindere stabilă și rapidă. Din cauza nerezolvării primelor două dificultăți grătarul respectiv s-a arătat cu totul insuficient pentru arderea ligniților.

Considerăm necesară luarea următoarelor măsuri pentru valorificarea rezultatelor obținute:

— Construirea unui prototip de grătar cu împingere răsturnată, care să fie instalat la un cazan aflat în funcțiune la o întreprindere industrială, deci de la început pentru exploatare industrială. După omologarea acestuia urmează a se trece la producția în serie. Institutul de energetică urmează a participa direct la proiectarea grătarului, precum și la punerea lui în funcțiune.

— Acordarea de fonduri și mijloace pentru adaptarea unui mic grătar cu împingere răsturnată la instalația experimentală existentă de la Institutul de energetică, unde urmează a se face cercetări în vederea perfecționării tipului respectiv de grătar, mai ales în ceea ce privește profilarea corespunzătoare a camerei de ardere.

## CONSFĂTUIREA ORGANIZATĂ DE CONSILIUL CENTRAL A.S.I.T. ȘI INSTITUTUL DE ENERGETICĂ AL ACADEMIEI R. P. R. ÎN PROBLEMA CONSUMULUI SPECIFIC DE ENERGIE

DE

NAGY CSABO

Consfătuirea ținută la București în zilele de 5—6 decembrie 1955, în problema consumului specific de energie, a fost a doua de acest fel.

La consfătuire s-au prezentat șase referate: Academia R.P.R. a ținut referatul introductiv, referatele prezentate de Ministerul Industriei Chimice, Ministerul Industriei Petrolului, Ministerul Industriei Ușoare și Ministerul Industriei Lemnului, Hîrtiei și Celulozei au tratat stadiul actual al problemei și unele realizări obținute în acest domeniu în ministerul respectiv; referatul Inspectoratului energetic a scos la iveală în mod critic o serie de lipsuri în legătură cu studiul și normarea consumului specific de energie.

Consfătuirea avea în primul rînd rolul de a mobiliza cercuri cît mai largi pentru acțiunea reducerii consumului specific de energie și în al doilea rînd de a lărgi schimbul de experiență între cei ce se ocupă de această problemă. Ea a oglindit faptul, foarte important,

că de la prima consfătuire s-a făcut un pas înainte în domeniul studiului consumului specific de energie în R.P.R.

Referatele prezentate la consfătuirea din vara anului 1954 au avut un caracter teoretic și s-au bazat pe studii bibliografice, pe cînd în decembrie 1955 referatele s-au bazat pe un material studiat și cules în întreprinderile din țara noastră.

Această consfătuire a scos la iveală și o serie de realizări privind economia de energie electrică, obținute ca rezultat al studiilor întreprinse și a măsurilor luate pe baza acestor studii.

Discuțiile au scos la iveală numeroase aspecte interesante ale problemei. Dintre concluziile discuțiilor, trebuie reținută semnalizarea faptului că, conducerile departamentelor nu au participat la această consfătuire; or, pentru ca această acțiune, atît de importantă, să dea toate roadele pe care le poate da, și pentru a evita energeticienilor o serie de greutăți și piedici inutile datorite indiferenței celorlalte cadre tehnice față de această problemă, este necesar ca atît conducătorii sectoarelor respective cît și conducătorii întreprinderilor, să fie convinși de importanța acestei secțiuni și să o sprijine în mod activ.

Recomandările consfătuirii ar trebui să fie cunoscute de toate cercurile interesate.

Recomandările cuprind 14 puncte privind:

1) legătura strînsă între îmbunătățirea procesului tehnologic, ridicarea productivității și reducerea consumului specific de energie;

2) necesitatea de a organiza grupe de cercetători pe lîngă fiecare departament pentru acțiunea normării consumului specific de energie;

3) întărirea serviciilor energetice;

4) subordonarea serviciului energeticianului-șef, direct de inginerul-șef, în întreprinderile mari;

5) sarcini concrete, date de conducerile întreprinderilor organelor respective pentru reducerea consumului specific de energie;

6) studierea de către conducerile întreprinderilor și departamentelor a introducerii termoficării pe o scară cît mai largă;

7) dotarea întreprinderilor cu aparatele de măsură necesare;

8) transformarea acțiunii pentru reducerea consumului specific de energie într-o largă mișcare de masă;

9) realizarea la Institutul de energetică a unor studii complete, care să servească ca model pentru întreprinderile similare;

10) recomandarea ca Institutul de energetică să se ocupe de problema ameliorării instalațiilor de ardere;

11) lărgirea acestei acțiuni și transformarea ei într-o mișcare de masă prin colaborarea dintre Inspectoratul energetic și A.S.I.T.;

12) lărgirea acțiunii prin organizații sindicale și cercuri A.S.I.T.;

13) aplicarea recomandărilor consfătuirii din 6—7 august 1954;

14) publicarea în revistele A.S.I.T. a cîte o dare de seamă asupra consfătuirii.

Capitolul III. *Arderea la presiune variabilă* tratează problemele arderii la presiune variabilă schematizate în cadrul a două procese complexe:

— arderea la volum constant și destinderea izentropică a gazelor arse;

— arderea la presiune constantă și destinderea izentropică a gazelor arse.

Pentru calculul acestui mod de ardere se prezintă diagramele *US* și *IS*, precum și metodele analitice.

Se studiază calculul randamentului termodinamic al principalelor cicluri de mașini termice cu gaze. Se studiază de asemenea calculul parametrilor de stare în punctele principale ale ciclului la aceste mașini, în ipoteza gazelor perfecte și a existenței fenomenului de disociație. Acest calcul se face fie grafic — în diagrame, fie cu o metodă grafo-analitică.

Capitolul IV. *Calculul proceselor de ardere cu ajutorul diagramelor termodinamice generalizate* introduce o metodă de calcul ce se poate aplica oricărui combustibil, la orice presiune și temperatură cu o precizie suficientă pentru calculele termice. Autorul introduce principiul diagramelor generalizate, arătîndu-le modul de construcție, și felul cum se lucrează cu acestea.

Capitolul V. *Exemple de calcul* exemplifică numeric metodele de calcul expuse în capitolele precedente. În cele 25 de probleme prezentate sînt notate pe larg și complet exemple de:

— folosirea mărimilor termodinamice ale gazului perfect;

— calculul evoluțiilor simple ale gazelor perfecte;

— calculul arderii la presiune constantă;

— calculul arderii la presiune variabilă;

— calculul arderii cu ajutorul diagramelor termodinamice generalizate.

Anexele acestei lucrări sînt reprezentate prin tablouri și diagrame.

Se prezintă tabelele privind proprietățile termodinamice (energie internă, entalpie și entropie — toate măsurate de la 0 °K) ale gazelor ce intervin în procesele de ardere: aer, bioxid de carbon, apă, oxigen, azot, oxid de carbon, hidrogen, oxidril, monoxid de azot, hidrogen atomic și oxigen atomic. Se dă în continuare căldura de reacție pentru arderea oxidului de carbon, a hidrogenului, a oxidrilului, a monoxidului de azot, a hidrogenului și a oxigenului atomic și a carbonului. Tablourile conțin proprietățile termodinamice (energie internă sensibilă, entalpie sensibilă, entropie și căldura de reacție la volum constant și la presiune constantă) pentru o serie de gaze combustibile. Se dau de asemenea constantele de echilibru a 7 echilibre chimice omogene, importante din punct de vedere al proceselor de ardere tehnică.

Valorile acestor constante sînt date din 50 în 50 de grade în scara absolută a temperaturilor și corespund datelor celor mai noi din literatură.

Diagramele (de format mare și cuprinse într-o mapă separată) conțin:

— diagrama *IT* cu disociație pentru gazele care se obțin prin arderea în aer a unui metru cub normal de metan, la presiunea de 1 ata;

— diagrame pentru calculul ciclurilor motoarelor cu aprindere prin scînteie (cuprinzînd o diagramă $u_s s$ pentru calculul compresiei și mai multe diagrame $u_t s$ pentru calculul destinderii la diferite dozaje);

— diagrama pentru calculul ciclurilor motoarelor cu aprindere prin compresie și a turbinelor cu gaze (diagrama *TS* cu axe curbe pentru diferite calități de combustibil);

— diagrame termodinamice generalizate.

În rezumat, lucrarea *Calculul proceselor de ardere* se remarcă prin metodă clară de prezentare, înalt nivel științific de expunere, introducerea ultimelor cuceriri științifice în domeniul studiului termodinamic al arderii și prin bogatul material documentar.

În încheiere trebuie arătat că Editura Academiei R.P.R. se achită bine de grelele probleme impuse de tipărirea lucrării, realizînd reproduceri corecte și plăcute de pe toate diagramele și schemele grafice.

*Adrian Călin Vasilescu* și *Victor Pimsner*

A. A. BULGAKOV, *Ciastotnoe upravlenie asinhronnîh elektrodvigatelei* (Reglajul vitezei la motoarele asincrone prin variația frecvenței sursei de alimentare). Izd. Akad. Nauk. SSSR, Moscova, 1955, 216 pag.

Lucrarea cuprinde 6 capitole, introducere, anexe și bibliografie.

În introducere autorul scoate în evidență domeniul de aplicație al acestui gen de acționare electrică, avantajele și dezavantajele lui în comparație cu agregatele de curent continuu folosite pentru aceleași scopuri.

Dacă, în general, acest mod de reglare a vitezei este mai puțin recomandabil, din punct de vedere economic, decît cel de curent continuu totuși, în ultimii 20 de ani sfera de aplicare a acestuia crește continuu.

În modul cel mai efectiv, acționarea electrică prin motoare asincrone alimentate de la o sursă de frecvență variabilă se folosesc în domeniile următoare:

1) acționarea individuală a unui mare număr de mașini de lucru care funcționează sincron;

2) acționarea electrică a mașinilor de viteze superioare (pînă la 120 000 rot/min — tunel aerodinamic pentru încercarea avioanelor reale);

3) acționarea electrică a agregatelor de putere mare;

4) acționarea electrică în domeniul tracțiunii electrice.

De aici rezultă importanța deosebită a studiului acestei probleme pentru economia națională.

Autorul trece în revistă aportul cercetătorilor sovietici în această problemă.

În capitolul I intitulat *Punerea problemei*, autorul scoate în evidență mărimile independente, care pot caracteriza comportarea motorului asincron în regimul de funcționare cu frecvență variabilă, precum și relațiile dintre aceste mărimi.

Aceste mărimi sînt:

1) frecvența curentului statorului, sau raportul dintre frecvența curentului și frecvența nominală;

2) momentul sarcinii aflată la arborele motorului;

3) raportul tensiunii aplicate la bornele statorului către frecvența curentului statoric, prin variația căruia se poate varia fluxul util al mașinii.

În continuare, autorul analizează legile de variație ale raportului tensiunii pe frecvență, care asigură condițiile optime de funcționare ale motoarelor printr-o gamă foare largă de variație a vitezei unghiulare a rotorului, cît și ale momentului de sarcină.

Realizarea oricărui regim de funcționare și schema acționării electrice de variație a vitezei prin variația frecvenței sursei de alimentare dictează aplicarea regulatorilor automați.

Stabilirea relațiilor dintre mărimile variabile, care permit să se obțină un regim rațional de funcționare a mașinii cu ajutorul reglajului automat — constituie o parte însemnată a lucrării.

Pentru cercetarea caracteristicilor motorului asincron în aceste regimuri de funcționare, autorul folosește metoda ecuațiilor vectoriale și schema echivalentă clasică exactă a mașinii sincrone, utilizînd sistemul de unități relative.

În capitolul II se face un studiu analitic al caracteristicilor motorului asincron în regim normal de funcționare, adică pentru regimul în care tensiunea la bornele statorului variază proporțional cu frecvența sa — cu parametrul $\lambda$.

Astfel, se studiază locul geometric al alunecării absolute a rotorului, al curentului statoric, modul de construcție a diagramelor circulare, precum și caracteristicile de funcționare ale motorului, pentru diverse valori ale parametrului $\lambda$.

Capitolul III, *Despre dinamica procesului de reglare a vitezei motorului asincron, cu ajutorul variației de frecvență*, tratează procesele tranzitorii care iau naștere în sistemul de

acționare electrică de acest gen, în timpul diverselor operații: pornire, frînare și inversare a sensului de rotație.

Analiza se efectuează fără luarea în considerație a proceselor tranzitorii electromagnetice în două ipoteze: în ipoteza frecvenței constante și a variației lente a acesteia.

În capitolul IV, se analizează caracteristicile mecanice ale motorului asincron cînd tensiunea variază independent de frecvență — arătîndu-se de asemenea metodica de calcul a acestor caracteristici pentru cazul motorului asincron cu parametri variabili ai rotorului.

Capitolul V cuprinde analiza diverselor moduri de reglaje a tensiunii și frecvenței pentru obținerea unui regim optim de funcționare a motorului.

Astfel se analizează cazurile cînd:

— tensiunea se reglează în funcție de frecvență și de sarcină;

— reglajul tensiunii se efectuează în funcție de căderea de tensiune în rezistența statorului;

— frecvența se reglează independent de tensiune.

În capitolul VI se analizează schemele cele mai larg folosite în practică de acest gen de acționare electrică:

— acționarea individuală a transporturilor cu role (rolgang), acționarea electrică a mașinilor din industria textilă (filat, răsucit), acționarea electrică a agregatelor la viteze ultraridicate de putere medie, acționarea electrică a instalațiilor de mare putere (20 — 60 000 kw), în tracțiunea electrică.

În anexă se ilustrează un exemplu concret.

Referințele bibliografice în număr de 54 reprezintă toată literatura tehnică sovietică publicată în acest domeniu în ultimii 30 de ani, cît și o serie de lucrări din literatura tehnică apuseană.

Monografia, deși expusă la un înalt nivel științific, poate fi ușor urmărită, autorul subliniind punctele esențiale ale problemelor tratate, pe care le rezolvă pînă la capăt.

Traducerea acestei lucrări în limba romînă ar fi foarte indicată.

*V. N. Nedelcu*
Candidat în științe tehnice

JACKY WEILL, *Progrès récents dans le controle des réacteurs* (Progrese recente în reglarea reactorilor), L'onde Electrique, octombrie 1955, **35**, nr. 343, p. 867.

Autorul articolului, al cărui nume este bine cunoscut în literatura privitoare la reglajul reactorilor nucleari, își propune să expună realizările recente obținute în acest domeniu la centrul de cercetări din Saclay. O altă intenție a autorului care, deși nu rezultă din titlul articolului, devine evidentă la lectura acestuia, este de a expune sistematic principiile și metodele fundamentale privitoare la reglarea reactorilor.

Prima parte a articolului se ocupă cu problema măsurării puterii într-un reactor nuclear. După stabilirea limitelor în care variază fluxul de neutroni într-un reactor cu apă grea și într-un reactor cu grafit, se trec în revistă camerele de ionizare și termocuplele speciale detectoare de neutroni. Se examinează sensibilitatea camerelor de ionizare la radiația $\gamma$ și metodele de a o reduce prin filtrare sau prin camere compensate.

De remarcat existența unor camere de ionizare care pot funcționa în fluxuri de neutroni foarte mari și au dimensiuni mici, camere care servesc la determinarea distribuției în spațiu a fluxului de neutroni din interiorul reactorului. Mai în detaliu este examinată problema amplificării semnalelor furnizate de camerele de ionizare. Se dau schemele a trei tipuri de amplificatori dintre care ultimul, bazat pe transformarea semnalului continuu în semnal alternativ, cu ajutorul unui condensator de vibrație, se remarcă printr-o stabilitate foarte bună a nivelului de zero.

Tendința de a clasifica și sistematiza se manifestă și în partea a doua a articolului, destinată automatizării complete a reactorilor nucleari. Autorul arată considerentele care fac necesar ca reactorul să lucreze un timp cît mai îndelungat la puterea maximă. În consecință, reglarea puterii în funcție de sarcină trebuie să se facă numai în caz de absolută necesitate (ex. centrală nucleară debitînd pe o rețea separată).

Se dau cîteva scheme bloc de reglaj automat al reactorilor, o teorie aproximativă, precum și date experimentale asupra caracteristicilor dinamice ale sistemului. Se trec în revistă și problemele efectului temperaturii, a otrăvirii reactorului cu produse de fisiune precum și a securității funcționării.

Această parte constituie de fapt o expunere mai sistematică și mai rezumativă a unor rezultate care se găsesc expuse mai pe larg în articolele anterioare.

În ansamblu, se constată că autorul a folosit în special materialele de la centrul de cercetări de la Saclay, fapt care se răsfrînge negativ asupra valorii articolului ca studiu de sinteză.

În articol nu se discută unele realizări recente în reglajul reactorilor, de exemplu reglajul discontinuu.

În special datorită materialelor relative la amplificatori, articolul reprezintă o completare valoroasă a literaturii privitoare la reglajul automat al reactorilor nucleari.

*M. V. Popov*

# DIN ACTIVITATEA INSTITUTULUI DE ENERGETICĂ AL ACADEMIEI R.P.R.

În cele ce urmează sînt cuprinse pe scurt principalele cercetări întreprinse în cadrul secţiilor Institutului de energetică în anul 1955.

## SECŢIA ENERGETICĂ GENERALĂ

Urmărind studiul normării şi reducerii consumului specific de energie electrică în industrie s-au obţinut următoarele realizări:

— Metodologia normării consumului specific de energie electrică în industrie, în care sînt expuse pe baza studiilor şi a experienţei cîştigate metodele de normare şi cîteva indicaţii pentru reducerea consumului de energie electrică.

— S-a elaborat o metodă simplă pentru normarea consumului de energie electrică în cazul producţiei cu mai multe sortimente. Metoda a fost aplicată la o fabrică de celuloză şi a dat rezultate bune.

— S-au întocmit două lucrări pentru stabilirea consumului specific de energie electrică avînd la bază bilanţul energetic, una la un cuptor cu arc pentru elaborarea oţelului electric şi alta pentru două cuptoare de carbid.

— S-a organizat în colaborare cu A.S.I.T. în 5—6 decembrie consfătuiri pe ţară în problema consumului specific de energie. La această consfătuire secţia a prezentat un referat în care s-a tratat aspectul general al problemei.

În cadrul problemelor de energetică agricolă şi rurală s-a întocmit studiul: *Sistem de indici pentru electrificarea agricolă şi rurală*. Aceşti indici au fost folosiţi pentru stabilirea necesarului anual de energie şi putere, de care s-a ţinut seama la întocmirea schiţelor de plan de perspectivă pentru electrificarea regiunilor din ţară.

Următoarele probleme au fost studiate de secţie şi rezolvate numai parţial: *Balanţa energetică generală*, *Alegerea raţională a schemelor electrice* şi *Metodologia pentru stabilirea potenţialului hidroenergetic al ţării*.

## SECŢIA DE TERMOENERGETICĂ

Cea mai importantă problemă cercetată în cadrul secţiei a fost problema arderii combustibililor. Această problemă a fost atacată concomitent sub mai multe aspecte:

— arderea combustibililor inferiori: turbă şi rumeguş de lemn şi în special ligniţi;

— arderea combustibililor gazoşi sub forma combustiei fără flacără.

În cadrul problemei: *arderea combustibililor inferiori*, s-au întreprins:

— cercetări experimentale cu ajutorul unui focar experimental construit în cadrul institutului;

— cercetări experimentale la focare existente în țară;

— cercetări de laborator pe bază de modele.

Întrucît problema arderii combustibililor inferiori este o problemă deosebit de importantă pentru economia națională a fost abordată ca o problemă complexă de cercetare.

Pînă în prezent s-a construit la Institutul de energetică focarul experimental cu ajutorul căruia urmează să se efectueze cercetările. De asemenea, s-au încercat instalații din țară echipate cu grătar fix, cu grătar cu împingere superioară și cu grătar catenar. În 1956 urmează să fie studiate instalații echipate cu moară ventilator introdusă la propunerea Institutului de energetică.

Problema stabilirii tipului optim de grătar pentru ligniții romînești a găsit o primă rezolvare în cadrul unor încercări întreprinse pe grătarul cu împingere răsturnată.

În problema combustiei fără flacără nu s-a ajuns încă la un stadiu la care să se poată trage concluzii.

S-au cercetat de asemenea posibilitățile de exploatare rațională a sondelor de gaz metan cu ajutorul compresorului cu jet. În urma cercetărilor întreprinse de Institut au fost construite și puse în exploatare șase compresoare cu jet care contribuie la alimentarea capitalei R.P.R. cu gaz metan.

A fost de asemenea studiată folosirea energetică cu ajutorul unei turbine de trecere a gazului metan înainte de ardere sau chimizarea lui. În cursul anului se va construi o turbină experimentală cu ajutorul căreia vor fi verificate aspectele teoretice ale acestei probleme.

În vederea ridicării nivelului tehnic al exploatării în diverse ramuri industriale au fost întreprinse studii de consum de combustibil care s-au soldat cu reduceri importante de consum de combustibil și creștere corespunzătoare a productivității agregatelor examinate.

A fost de asemenea examinată problema termoficării industriale și urbane, și posibilitățile de introducere în R.P.R.

În acest sens au fost întocmite o serie de studii referitoare la consumul de căldură, centrale și rețele de termoficare care sînt folosite în institutele de proiectări pentru rezolvarea diverselor aspecte, de proiectare ale acestei probleme.

În cadrul secției au mai fost cercetate problemele în legătură cu cazanul V u i a și domeniile lui de aplicare. S-a cercetat un prototip experimental de 0,2 t/h și s-a construit un prototip de 1 t/h. Rezultatele parțiale obținute sînt deocamdată incomplete, problema continuînd-se și în anul 1956.

## SECȚIA MOTOARE CU ARDERE INTERNĂ

În anul 1955 în problema: *Studiul motoarelor cu ardere internă fabricate în R.P.R., în vederea îmbunătățirii lor*, s-a studiat motorul RM—15 fabricat la Uzina « Matyas Rákosi » din București. Astfel s-au stabilit caracteristicile de funcționare, stabilitatea indicilor economici, măsurătorile mecanice ale motorului (după această primă etapă urmează etapa a 2-a, încercările de durată).

În problema *Studiul reducerii cifrelor octanice ale benzinelor auto* s-au stabilit caracteristicile de detonație incipientă la motorul auto-camionului ZIS—150, în condiții de cale și s-a amenajat un banc complet de încercări pentru același motor.

În problema *Studiul comportării motoarelor KD—35 la funcționarea cu motorină de cracare*, colaborînd cu I.C.M.E.A., s-a ajuns la concluziile definitive asupra necesității adaosurilor de motorină de cracare în motorina primară, mai ales asupra organelor de injecție și în primul rînd asupra injectoarelor.

## SECȚIA COMBUSTIBILI SOLIZI

S-a studiat și s-a încheiat o lucrare amplă privind toate zăcămintele de turbă din R.P.R. Studiul s-a desfășurat atît asupra caracterelor chimico-tehnice cît și tehnologice, și prin el se pun la îndemîna celor interesați date privind posibilitățile de utilizare termo-energetică și chimico-tehnologică a acestui material.

Secția s-a preocupat în lucrările sale și de celelalte zăcăminte de combustibili solizi, încheind un studiu în care sînt cuprinse datele chimico-tehnice și tehnologice ale tuturor ligniților și cărbunilor bruni, urmînd ca în continuare să se studieze și celelalte sorturi de cărbuni (huile și antraciți). Acest studiu va da posibilitatea să se stabilească sarcinile de dezvoltare în viitoarele cincinale pentru valorificarea rațională a combustibililor din țară.

O problemă de mare importanță prin urmările ce le poate avea asupra posibilităților de utilizare a ligniților noștri, îl constituie studiul de reducere a conținutului de steril din acești cărbuni; prin această lucrare se urmărește obținerea unui cărbune cu procent acceptabil de cenușă, susceptibil de a fi folosit fără inconveniente. Rezultatele obținute sînt promițătoare.

Problema gazeificării ligniților este de asemenea înscrisă în planul de lucru al secției. Rezultatele obținute s-au tradus printr-o îmbunătățire a procesului de gazeificare la una din stațiile gazogene din țară.

În același timp s-au studiat posibilitățile de valorificare, prin gazeificarea, a mai multor sorturi de ligniți.

Ținînd seama de directivele trasate de Congresul al II-lea al P.M.R., studiile de gazeificare a ligniților vor căpăta o amploare tot mai mare.

În afară de aceste probleme care deschid perspective dar prezintă interes imediat, secția a mai lucrat și la un studiu de desulfurare a cocsurilor aplicat cărbunilor noștri.

Din realizările de pînă acum se vede că secția de Tehnologia combustibililor solizi are preocupări multiple și variate în imediată legătură cu practica și pe care va căuta să le păstreze și să le adîncească și în viitor.

## SECȚIA ELECTROENERGETICĂ ȘI ELECTROTEHNICĂ

În problema supratensiunilor de origine atmosferică în rețelele electrice, pentru întocmirea unei statistici izocheraumice obiective s-a realizat și experimentat un aparat de numărare automată a trăznetelor care cad într-o regiune; pentru protecția instalațiilor electrice împotriva trăznetelor s-a realizat o instalație de impuls de curent necesară etalonării unor bețișoare magnetice care să poată măsura curenții de trăznet, s-au efectuat studii documentare privind protecția stațiilor electrice, s-a acordat asistență tehnico-științifică Ministerelor Industriei Cărbunelui și Petrolului în vederea proiectării economice a prizelor de pămînt, s-au elaborat și experimentat două noi metode pentru măsurarea rezistivității solurilor.

Pentru precizarea cauzelor supratensiunilor interne în rețele cu neutrul izolat s-a cercetat influența armonicilor de tensiune în fenomenul de supratensiune datorită « punerii la pămînt » a unei faze.

În problemele stabilității statice și dinamice legate de interconexiunea centralelor în sistemele electroenergetice s-au studiat căi noi de analiză, simple și precise și s-au adus precizări importante în înțelegerea fenomenelor. Pentru studiul fenomenelor complicate ale funcționării sistemelor electrice s-au întocmit proiectele unui model cu mașini electrice rotative; este în curs de realizare modelul generatorului sincron și al liniei de transport.

În domeniul problemelor legate de electrificare în mediul rural se menționează:

Un studiu tehnico-economic, în funcție de condițiile specifice țării noastre, privind procedeele de alimentare a consumatorilor rurali; un studiu teoretic și experimental referitor

la comportarea unor conductori din aluminiu, oțel sau zinc din punctul de vedere al încălzirii, conductibilității, efectului pelicular, coroziuni în vederea precizării cazurilor de utilizare.

Pentru producerea energiei electrice în mediul rural s-a alcătuit un studiu de recomandare a tipului optim de generator sincron și s-a proiectat un sistem de reglaj al tensiunii care folosește un aparataj simplu și economic, și asigură calitatea unor caracteristici electroenergetice în electrificarea rurală.

S-a studiat de asemenea o schemă simplă de autoexcitare cu folosirea redresorului mecanic calat pe rotor.

În problema automatizării proceselor de producție s-au realizat dispozitive de control automat și măsurarea calității unor fibre și produse textile, s-a stabilit o metodică preliminară și s-a proiectat un prototip de selsin.

În vederea ridicării caracteristicilor sistemelor complicate de automatizare s-a realizat un dispozitiv transferometru. Pentru a veni în ajutorul industriei noastre electrochimice care utilizează curenți de mare intensitate s-a făcut un studiu tehnico-economic pentru delimitarea domeniilor de utilizare a mașinilor producătoare de curent continuu de mare intensitate și s-a realizat proiectul unui redresor mecanic cu contacte.

În problema mașinilor cu inductanță variabilă s-au adus contribuții noi la dezvoltarea teoriei și s-a realizat un prototip industrial de ciocan electric.

În problema regimului deformant s-au continuat cercetările prin efectuarea de măsurători și studii la cîteva instalații electrice în funcțiune.

## DEZVOLTAREA BAZEI MATERIALE A INSTITUTULUI DE ENERGETICĂ ÎN ANUL 1955

### Instalații experimentale pentru studiul arderii

Pentru stabilirea celui mai bun tip de focar destinat instalațiilor de capacitate mică și pentru culegerea de date asupra comportării în timpul arderii a diferitelor sorturi de combustibili inferiori, date necesare în vederea proiectării instalațiilor care ard asemenea combustibili, la Institutul de energetică s-au creat două instalații experimentale.

Prima instalație constă dintr-un focar adecvat unei instalații de capacitate mică realizat la scara 1 : 1. Instalația se compune dintr-un focar cu pereții ecranați, prevăzut cu un grătar înclinat cu trepte, un boiler care răcește gazele rezultate din ardere și un preîncălzitor de aer. Evident instalația mai comportă și o serie de anexe necesare conducerii arderii, pentru un studiu cît mai complet al ei.

Trebuie specificat că linia pe care colectivul a crezut de cuviință să meargă în cercetarea problemei, a fost aceea de la simplu la compus, adică de a studia comportarea cărbunilor pe cel mai simplu grătar, de a observa precis neajunsurile acestuia și de a trece apoi pe baza materialului obținut la elaborarea altor tipuri de grătar și chiar de camere de ardere, care să răspundă cerințelor unor arderi cît mai bune.

Întrucît studiul experimental al arderii necesită crearea mereu de noi condiții de ardere, bazei experimentale construite i s-au asigurat următorii parametrii variabili:

— înclinarea celor două porțiuni ale grătarului de ardere;

— forma barelor de grătar;

— distanța grătarului de ardere față de bolți;

— poziția grătarului de zgură;

— zonele de insuflare ale aerului pe sub grătar;
— zonele de insuflare ale aerului secundar de ardere;
— presiunea și debitul de aer insuflat sub grătar și a aerului secundar;
— temperatura de preîncălzire a aerului;
— suprafața ecranelor;
— înclinarea bolții anterioare și a celei posterioare;
— tirajul realizat de ventilatorul de gaze.

În afară de parametri amintiți mai sus, colectivul studiază posibilitatea turbionării în focar a flăcării precum și a dirijării radiațiilor trimise de zona incandescentă în porțiunea de uscare a combustibilului și pentru crearea pragului de aprindere. De asemenea, se studiază și se ține în rezervă uscarea inițială a combustibilului prin recircularea gazelor evacuate la coș, precum și sortarea și alimentarea pneumatică cu combustibil, astfel încît, să se realizeze o stratificare a combustibilului pe grătar, pînă cînd și dacă condițiile de experimentare vor cere o asemenea instalație.

În prezent, baza experimentală este realizată și în cel mai scurt timp colectivul va trece la efectuarea experiențelor.

A doua instalație experimentală creată este un model de focar, redus la scara 1:5 pentru studiul radiațiilor în focar. Pereții modelului sînt realizați din ghips perfect lustruit, iar grătarul este înlocuit cu o placă de sticlă. O sursă luminoasă emite radiații din zonele corespunzătoare zonelor de radiație, iar o celulă fotoelectrică va măsura intensitatea acestor radiații în diverse puncte ale focarului și în special pe grătar.

Scopul principal al acestei încercări de laborator este determinarea influenței poziției și formei bolților în ceea ce privește efectul radiațiilor asupra primei zone de pe grătar. Se va urmări de asemenea și măsura în care încercările de laborator corespund cu situația reală din focar.

Studiul teoretic al proceselor de ardere, concluziile care se vor trage din experimentări, folosind bogata experiență a Uniunii Sovietice în construcții de focare pentru combustibili inferiori și schimbul continuu de experiență cu cercetătorii din acest domeniu din țările prietene, vor sta la baza lucrărilor colectivului pentru rezolvarea cu succes a sarcinii pe care și-a asumat-o.

## Stațiunea experimentală de încercare de durată a motoarelor (S. E. D.)

Pentru încercările de durată ale motoarelor cu ardere internă s-a construit o stațiune experimentală de încercări de durată a motoarelor (S.E.D.).

După cum se știe, pentru determinarea stabilității caracteristicilor energetice ale motoarelor, pentru determinarea uzurilor mecanice în timpul funcționării și pentru determinarea calităților generale ale motoarelor în durată se efectuează o serie de încercări și măsurători specifice. De asemenea, se știe că omologarea definitivă a motoarelor studiate, în condiții de banc, nu se poate face decît prin efectuarea examenului de durată.

S.E.D.-ul a fost conceput pentru a putea fi utilizat în aceste scopuri atît prin construcția sa adecvată, cît și prin înzestrarea sa cu instalațiile și utilajul convenabil.

La sfîrșitul anului 1955 construcția S.E.D.-ului a fost terminată, rămînînd să se termine numai unele instalații speciale.

Amenajarea utilajului și a unor aparate de măsură este în curs, astfel încît în februarie a.c., într-una din cele două hale ale S.E.D.-ului, vor începe încercările de durată a unui motor fabricat la Uzinele «Matyas Rákosi» din București, care a trecut probele de banc.

## Laboratorul de petrografie

În cursul anului 1955, în cuprinsul secției de tehnologia combustibililor solizi a luat naștere sectorul de petrografie.

Înființarea acestui sector umple un gol foarte resimțit în cercetările de cărbuni și are ca obiect stabilirea, la un înalt nivel științific, a structurii fizico-chimice a cărbunilor cu ajutorul constituenților petrografici. Pe baza acestor studii se vor putea trage concluzii asupra genezei cărbunilor fosili și explica, pe cale științifică, diversele procese tehnologice la care sînt supuși cărbunii.

# ACADEMICIANUL PROF. I. S. GHEORGHIU

Acad. prof. I. S. Gheorghiu este originar din Bacău.

Studiile liceale le-a făcut în București reușind primul la bacalaureat.

Intră apoi în Școala de poduri și șosele, pe care o termină în 1909, obținînd diploma de inginer, fiind clasificat primul, ca șef de promoție.

Obținînd bursa Adamachi a Academiei Romîne, își continuă studiile la Paris la Școala superioară de electricitate, obținînd diploma de inginer electrician.

După terminarea studiilor se duce la Berlin, unde face practică timp de un an la fabricile A.E.G.

Se ocupă de problema electrificării căilor ferate, în care scop face o călătorie de studii în Germania, Franța și Italia.

Întors în țară, după aceste strălucite studii teoretice și cu o bună practică industrială, intră în anul 1911 ca inginer la Instalațiile electrice ale portului Con-

stanța. După un an este angajat la Societatea Tramvaielor București (S.T.B.), unde rămîne cîteva luni, trecînd apoi în Direcția generală C.F.R., fiind avansat foarte repede șef al Serviciului de electrificare. După 12 ani de serviciu în C.F.R. trece ca subdirector tehnic și apoi ca director tehnic la Întreprinderea de electricitate București, unde activează pînă în 1944.

Pe baza studiilor și a practicii efectuate în țară și străinătate, la 1 februarie 1921 este numit conferențiar în învățămîntul superior, concomitent la Facultatea de științe și la Politehnica din București, devenind în 1926 profesor definitiv de mașini electrice la Politehnică, iar după 1948 șef al catedrei în această specialitate.

În lunga sa activitate tehnică, prof. I. S. Gheorghiu a întocmit primele proiecte de electrificare a liniei Ploești—Orașul Stalin, a proiectat și executat cele mai importante înfăptuiri ale Întreprinderii de electricitate București, ca: transformarea Uzinei Filaret; extinderea rețelei de 5000 V în afara Capitalei; introducerea cablului subteran de 30 000 V; electrificarea rurală în jurul Bucureștiului; exploatarea liniilor de 110 000, 60 000 V și a hidrocentralei Dobrești, modernizarea și extinderea uzinei Grozăvești, în special prin introducerea cazanelor Löffler cu turbină înaintașă, soluție relativ nouă la acea epocă și care a permis ridicarea puterii uzinei Grozăvești de la 30 000 kW la 80 000 kW etc.

Participarea directă la aceste mari înfăptuiri tehnice pe tărîm electrotehnic sînt urmarea temeinicei pregătiri teoretice și bogatei experiențe acumulate de ing. I. S. Gheorghiu.

Datorită multiplelor sale cunoștințe tehnice a funcționat ca președinte sau membru în Consiliul superior al energiei, în Consiliul superior al exploatărilor comunale și în Consiliul tehnic superior, deci a celor mai înalte foruri de îndrumare în domeniul electrotehnic din țara noastră. În aceste funcțiuni a luat parte la elaborarea celor mai importante proiecte și lucrări în domeniul tehnic și mai ales energetic, care s-au efectuat în ultimii 25 de ani în țară.

Bogata experiență cîștigată în funcțiunile și comisiile în care a lucrat i-au permis să desfășoare o foarte rodnică activitate și pe tărîm didactic. Zeci de promoții de ingineri electromecanici și electrotehnici de la Politehnica din București, au putut și pot beneficia de cunoștințele prof. I. S. Gheorghiu. Prelegerile sale de mașini electrice sînt pătrunse de rigoarea științifică împletită în mod armonios cu partea aplicată, menținînd la nivelul corespunzător unui învățămînt superior îmbinarea teoriei cu practica. La bogatele sale cunoștințe și larga sa experiență se adaugă calitățile sale pedagogice și dorința de a se face cît mai bine înțeles de auditorii săi. Cursurile sale sînt mereu împrospătate cu toate noutățile științifice și tehnice, ca astfel să țină pasul în progresele realizate. Se poate spune pe drept cuvînt că acest curs de mașini electrice, prin modul cum a fost și este predat, reprezintă unul din stîlpii de susținere ai învățămîntului electrotehnic de la Politehnica din București.

Prof. I. S. Gheorghiu nu a fost, însă, numai un mare realizator în domeniul electrotehnicii și un distins profesor cu calitățile care se cer acestei îndeletniciri; el a fost și un adevărat și fecund cercetător în acest domeniu.

Prima sa publicație apare în 1911 și de atunci numărul publicațiilor sale sporește an cu an, ajungînd la un total de 50 de lucrări în domeniile tehnicii generale și a științelor tehnice, precum și a problemelor tehnico-economice. În acest total se cuprind și cursurile de mașini electrice pe care le profesează la Institutul politehnic, apărute în mai multe ediții.

În lucrările sale abordează diferite domenii:

*a)* Electrificarea căilor ferate, introducînd sau precizînd unele noțiuni puțin cunoscute la epoca cînd aceste lucrări erau publicate, cum ar fi traficul critic în studiul rentabilității electrificării căilor ferate, aplicarea lungimilor virtuale pentru stabilirea diagramelor de consum, stabilirea unei formule pentru stabilirea rampei de la care electrificarea unei linii începe a fi mai avantajoasă decît dublarea, în ce privește sporirea capacității de trafic, introducerea în calculul rentabilității unei electrificări de cale ferată a locomotivelor cu vapori ce rămîn disponibile prin electrificare etc.

*b)* Problema repartizării puterilor active și reactive la mersul în paralel al uzinelor electrice, stabilind unele metode originale de cercetare.

S-a ocupat apoi de rolul puterii sincronizante la mersul în paralel al alternatoarelor.

*c)* A studiat chestiuni în legătură cu determinarea reactanțelor parțiale de scăpări la transformatoare.

*d)* Forțele axiale la transformatoare, aducînd interesante contribuții teoretice și experimentale.

*e)* Studiul motoarelor alternative cu colector prin aplicarea teoriei cvadripolilor.

*f)* Cercetări asupra pornirii și funcționării comutatricei autoexcitate.

*g)* Teoria unitară a mașinilor electrice, problemă interesantă prin ideea de a se da o teorie generală, din care se pot particulariza diversele mașini electrice cunoscute.

*h)* Diferite studii în domeniul tarifelor pentru energia electrică, între care se menționează o metodă originală pentru a face comparabile tarife bazate pe ipoteze diferite.

Unele din aceste lucrări sînt citate în diferite reviste din țară și străinătate.

A participat la diverse Congrese din țară și străinătate, aducînd contribuții importante.

Pentru activitatea sa susținută și remarcabilă pe tărîm științific, didactic și tehnic, prof. I. S. Gheorghiu a fost membru în fosta Academie de științe și apoi ales membru corespondent al Academiei R.P.R. în 1948, iar din 1952 a fost ridicat la gradul de membru titular, și distins cu Ordinul Muncii cl. I din anul 1953. În prezent este președinte al Secției a 3-a tehnice și membru al Prezidiului Academiei R.P.R.

Din 1951 este director al Institutului de energetică al Academiei R.P.R., contribuind într-o largă măsură la organizarea și dezvoltarea acestei importante instituții de cercetare.

În activitatea sa de pretutindeni, în întreprinderi, în învățămînt sau în Academie, prof. I. S. Gheorghiu, prin blîndețea sa, și-a apropiat colaboratorii, pe care în toate ocaziile a căutat să-i sprijine, să le dea îndrumarea necesară pentru a-i forma cît mai desăvîrșit în specialitate. În cadrul Academiei are și sarcina de a conduce aspirantura în domeniul mașinilor electrice, continuînd astfel ridicarea de cadre de înaltă calificare profesională.

La împlinirea a 70 de ani de vîrstă și 45 de ani de activitate profesională, acad. prof. I. S. Gheorghiu desfășoară o rodnică activitate pe toate tărîmurile, activitate lărgită prin mijloacele și sprijinul ce i s-au pus la dispoziție de regimul actual.

Foștii săi studenți și actualii săi colaboratori l-au sărbătorit cu prilejul acestei aniversări, înconjurîndu-l de prețuirea ce se cuvine unui adevărat profesor.

*Prof. Dr. CESAR PARTENI ANTONI*
Rector al Institutului politehnic, București

# ACADEMICIANUL PROF. C. I. BUDEANU

Electrotehnica romînească şi cea internaţională numără printre fruntaşii ei pe acad. prof. C. I. Budeanu, care, prin contribuţia sa în lămurirea problemei puterii reactive, a introdus în electrotehnică un capitol a cărui importanţă creşte pe măsură ce se dezvoltă electrificarea.

Academicianul prof. C. I. Budeanu s-a născut la 16 februarie 1886 în oraşul Buzău. În 1903 a fost admis în Şcoala naţională de poduri şi şosele din Bucureşti, pe care a absolvit-o în 1908, obţinînd diploma de inginer. În acelaşi an se prezintă la concursul ţinut de Academia Romînă şi obţine pentru 2 ani bursa « Adamache » cu care pleacă la Paris, unde urmează cursurile Şcoalei superioare de electricitate, pe care o absolvă în 1909, fiind clasificat printre primii.

După absolvirea Şcolii superioare de electricitate din Paris, face un stagiu de practică în întreprinderile de electricitate din Paris, la fabrica de maşini electrice A.E.G. şi la una din uzinele electrice ale oraşului Berlin.

Reîntors în țară în decembrie 1910, este angajat la Căile ferate ca șef de secție la Atelierele Grivița.

Din 1919 activează ca inginer la Societatea tramvaielor din București, iar apoi la întreprinderile de producere și distribuire a energiei electrice.

În anul 1916 a fost numit asistent pe lîngă Școala națională de poduri și șosele, pe lîngă cursul de electricitate și electrotehnică. La înființarea școalei politehnice din București, în 1920, a fost numit conferențiar la cursul de măsuri electrice și tracțiune electrică, post în care a fost confirmat în urma concursului depus. În 1926, în urma unui concurs, a fost numit profesor titular la același curs. A predat apoi cursul de electricitate și măsuri electrice. Din 1948, după reorganizarea învățămîntului superior, a fost numit profesor șef de catedră mai întîi la cursul de electricitate și electrotehnică, și apoi la cursul de bazele teoretice ale electrotehnicii, post pe care îl ocupă și astăzi.

Activitatea științifică, care se îmbină cu cea tehnică, și-a început-o din 1912, cînd a publicat un studiu asupra reostatelor lichide pentru încercarea generatoarelor electrice.

De atunci și pînă acum activitatea sa științifică este neîntreruptă: în acest răstimp, și în afară de conferințele ținute, a publicat un număr de 85 de lucrări, însumînd peste zece mii de pagini.

A participat la numeroase congrese și reuniuni științifice naționale și internaționale, unde a prezentat, aproape întotdeauna, comunicări.

Activitatea sa științifică și tehnică, multilaterală, are totuși două fire conducătoare distincte: unul în domeniul energetic, în care s-a ocupat în special de problema puterii reactive, și unul în domeniul metrologiei.

În primul domeniu, acad. prof. C. I. Budeanu a dat o largă contribuție în precizarea noțiunii de putere reactivă, prin o nouă demonstrație a proprietății de conservare, bazată pe realitatea fizică a mărimilor instantanee de puteri, tensiune și curent. Puterea reactivă apare astfel ca fiind substratul fizic al factorului de putere. O serie de propuneri și definiții date de acad. C. I. Budeanu au fost adoptate de forurile internaționale și intrate astăzi în uzul comun. Printre acestea citām denumirea unității puterii reactive.

Trebuie menționat că acad. prof. C. I. Budeanu a fost primul care a instalat în țara noastră un compensator sincron și a propus compensarea puterii reactive a motoarelor sincrone individuale cu ajutorul condensatoarelor statice.

În regimul nesinusoidal, criticînd vechiul punct de vedere al sinusoidelor echivalente, cît și anumite definiții date arbitrar puterii reactive într-un asemenea regim, acad. C. I. Budeanu a introdus o concepție nouă, aceea a separării puterii aparente în trei puteri, care pot fi reprezentate ortogonal într-un sistem tridimensional. Apare astfel, alături de puterile activă și reactivă, ale căror definiții au fost precizate cu această ocazie, o nouă mărime de putere, *puterea deformantă*, care caracterizează un asemenea regim.

Noțiunea de putere deformantă a fost introdusă în știință de acad. C. I. Budeanu în 1927. Prin numeroase alte cercetări, acad. C. I. Budeanu a scos în evidență o serie de proprietăți ale puterii deformante, cît și rolul pe care îl poate avea această mărime la studiul aparatelor și fenomenelor deformante într-o instalație electrică.

Noțiunea de putere deformantă și metodele de studiu ale regimurilor deformante sînt considerate astăzi ca chestiuni clasice de electrotehnică și ele figurează în tratatele corespunzătoare.

În ceea ce privește metrologia, acad. C. I. Budeanu este unul dintre cei mai mari susținători ai sistemului Giorgi, numit astăzi sistemul practic. În numeroasele sale lucrări, a arătat necesitatea unui sistem practic cu patru unități în electromagnetism, rezultînd din sistemul Giorgi, sub forma M.K.S.C. sau M.K.S.A. Punctul său de vedere a fost astăzi confirmat prin introducerea în mod obligatoriu — pe plan internațional — a sistemului practic general de unități M.K.S.A. Ca precursor, acad. Budeanu a introdus acest sistem de unități în învățămîntul electrotehnic, în cursul pe care îl predă la Institutul politehnic din București, încă de acum 15 ani.

Pentru deosebita activitate științifică pe care a depus-o, pentru începutul de școală pe care a creat-o, prof. C. I. Budeanu a fost numit în anul 1939 membru corespondent al Academiei Romîne, iar în 1955, membru titular al Academiei Republicii Populare Romîne.

Astăzi, la împlinirea celor 70 de ani de viață, acad. prof. C. I. Budeanu este în plină putere de muncă și creație.

Știința romînească va primi desigur încă multe contribuții prețioase din partea acad. prof. C. I. Budeanu, ridicînd la un nivel mai înalt prestigiul său internațional.

*Prof. Dr. I. S. ANTONIU*

*Dat fiind accentul deosebit pus de cel de al II-lea plan cincinal pe extinderea simțitoare a producției și transportului de gaz metan și pe mărirea importantă a investițiilor în sectorul industriei chimice a gazului metan, Institutul de energetică a considerat — pe baza studiilor întreprinse în colaborare cu M.I.P., încă din 1953 — că este necesar să se organizeze o Consfătuire pe țară, în care să se dezbată problema de perspectivă a politicii de utilizare energetică complexă a gazelor naturale fără a modifica destinația de utilizare sau valorile parametrilor de lucru a acestuia, ca și pentru a stabili o politică de exploatare cît mai judicioasă a rezervelor de gaze naturale.*

*Consfătuirea va avea loc în toamna acestui an și sperăm că larga și activa participare a inginerilor și tehnicienilor diferitelor departamente și institute care lucrează în acest domeniu va contribui la deplina ei reușită.*

# ERATĂ

| Pag. | rîndul sau formula | în loc de: | se va citi: |
|---|---|---|---|
| 126 | 12 de jos | $\frac{d\frac{1}{y}}{dt}$ | $\frac{d\left(\frac{1}{y}\right)}{d}$ |
| 127 | (3.2) | $\dots = \frac{\int_{t_0}^{t} e\,dt}{\dots}$ | $\dots = \frac{\left(\int_{t_0}^{t} e dt\right)_{\max}}{\dots}$ |
| 128 | (3.3) | $\dots = \frac{\int_{t_0}^{t} e dt_{\max} I_{ef}}{\dots} = \dots$ | $\dots = \frac{\left(\int_{t_0}^{t} e dt\right)_{\max} I_{ef}}{\dots} = \dots$ |
| 128 | (3.4) | $F = \frac{P_{\max}}{\dots} = \dots$ | $F = \frac{P_m}{\dots} = \dots$ |
| 128 | (4.2) | $\dots \frac{I_{ef}}{I_{\max}}$ | $\dots \frac{I_{ef}}{i_{\max}}$ |
| 130 | (5.8) | $\frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} i dt = \eta_i^2.$ | $\frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} i^2\,dt = \eta_i^2.$ |
| 130 | 2 de jos | $\frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} e dt = \varepsilon^2,$ | $\frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} e^2\,dt = \varepsilon^2,$ |
| 131 | 5 de sus | $E = \frac{1}{T}\left(\int_{t_0}^{t_1} e dt \dots\right.$ | $E = \frac{1}{T}\left(\int_{t_0}^{t_1} e^2\,dt \dots\right.$ |
| 131 | (5.15) | $\dots \frac{\dots}{\dots \sqrt{I^2 + \frac{\varepsilon^2}{\rho}}}.$ | $\dots \frac{\dots}{\dots \sqrt{I^2 + \frac{\varepsilon^2}{\rho^2}}}.$ |
| 132 | (5.19) | $\dots \frac{\dots \int_{t}^{t} \dots}{\dots}$ | $\dots \frac{\dots \int_{t_0}^{t} \dots}{\dots}$ |

c. 615. — Studii şi cercetări de energetică, nr. 1—2, 1956

+ 2 401

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

# STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

3

ANUL VI

IULIE — SEPTEMBRIE 1956

EDITURA ACADEMIEI REPUBLICII POPULARE ROMÎNE

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

# STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

3

ANUL VI

IULIE — SEPTEMBRIE 1956

EDITURA ACADEMIEI REPUBLICII POPULARE ROMÎNE

*COMITETUL DE REDACȚIE*

ACADEMICIAN I. S. GHEORGHIU — redactor responsabil; ACADEMICIAN C. BUDEANU; M. BERCOVICI, membru corespondent al Academiei R. P. R.; M. MARINESCU, membru corespondent al Academiei R. P. R.; C. DINCULESCU, membru corespondent al Academiei R. P. R.; A. AVRAMESCU, membru corespondent al Academiei R. P. R.; C. APETREI; G. BĂRĂNESCU

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

# STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

Tomul VI, nr. 3 Iulie-septembrie 1956

## SUMAR

Pag.

C. APETREI şi S. FAUR, Sarcini de cercetare actuale în domeniul energeticii 183

*ENERGETICĂ GENERALĂ*

V. NITU, Exprimarea matematică a siguranţei în exploatare a schemelor electrice . . . . . 189

*TERMOENERGETICĂ ŞI TERMOTEHNICĂ*

VICTOR PIMSNER şi ADRIAN CĂLIN VASILESCU, Influenţa unor parametri funcţionali şi constructivi asupra compresorului cu jet de gaze naturale . . . . . 207

A. C. VASILESCU, V. PIMSNER şi P. SVORONOS, Contribuţie la dezvoltarea teoriei politicii de exploatare a gazelor naturale folosind compresorul cu jet de gaze naturale . . . . . 219

*MAŞINI TERMICE*

A. C. VASILESCU şi V. PIMSNER, Influenţa dozajelor sărace asupra caracteristicii de putere a motoarelor cu aprindere prin scînteie şi combustibil lichid, transformate să funcţioneze cu gaze naturale . . . . . 243

*COMBUSTIBILI SOLIZI*

I. BLUM şi colaboratori, Studiul chimic şi tehnologic al turbelor din R.P.R. Nota II. Prelucrări mecanice şi procese chimico-tehnologice aplicate turbelor din R.P.R. . . . . 265

*ELECTROENERGETICĂ ŞI ELECTROTEHNICĂ*

PLAUŢIUS ANDRONESCU, Sistemul de măsuri ca parte integrantă din sistemul de mărimi . . . . . 281

C. APETREI şi M. ELEFTERESCU, Modelele electrodinamice ale sistemelor electroenergetice. Modelarea generatoarelor sincrone . . . . . 311

F. MANEA, Condiţii limită de stabilitate statică a sistemelor electroenergetice . . . . . 329

*NOTE* . . . . . 347

*AUTOREFERATE* . . . . . 363

*RECENZII* . . . . . 381

EDITURA ACADEMIEI REPUBLICII POPULARE ROMÎNE

ACADÉMIE DE LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE ROUMAINE
INSTITUT D'ÉNERGÉTIQUE

# ÉTUDES ET RECHERCHES D'ÉNERGÉTIQUE

Tome VI, n° 3 Juillet-septembre 1956

## SOMMAIRE

Page

C. APETREI et S. FAUR, Tâches actuelles de la recherche dans le domaine de l'énergétique . . . . . 183

*ÉNERGÉTIQUE GÉNÉRALE*

V. NITU, Expression mathématique de la sécurité dans l'exploitation des schémas électriques . . . . . 189

*THERMO-ÉNERGÉTIQUE ET THERMO-THECHNIQUE*

VICTOR PIMSNER et ADRIAN CĂLIN VASILESCU, Influence de certains paramètres fonctionneles et constructifs sur le compresseur à jet de gaz naturels . . . . . 207

A. C. VASILESCU, V. PIMSNER et P. SVORONOS, Contribution au développment de la théorie de la politique d'exploitation des gaz naturels en utilisant le compresseur à jet de gaz naturels . . . . . 219

*MACHINES THERMIQUES*

A. C. VASILESCU et V. PIMSNER, Influence des dosages pauvres sur la caractéristique de puissance des moteurs à combustible liquide avec allumage par étincelle, transformés pour fonctionner aux gaz naturels . . . . 243

*COMBUSTIBLES SOLIDES*

I. BLUM et collaborateurs, Étude chimique et technologique des tourbes de la République Populaire Roumaine. Note II. Usinage mécanique et processus chimico-technologiques auxquels sont soumises les tourbes de la R.P.R. . . . . 265

*ÉLECTRO-ÉNERGÉTIQUE ET ÉLECTRO-TECHNIQUE*

PLAUȚIUS ANDRONESCU, Le système de mesures en tant que partie intégrante du système de grandeurs . . . . . 281

C. APETREI et M. ELEFTERESU, Modèles électrodynamiques des systèmes électroénergétiques. Modélage des générateurs synchrones . . . . . 311

F. MANEA, Conditions-limite de stabilité statique des systèmes électroénergétiques . . . . . 329

*NOTES* . . . . . 347

*AUTORAPPORTS* . . . . . 363

*COMPTES-RENDUS* . . . . . 381

ÉDITIONS DE L'ACADÉMIE DE LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE ROUMAINE

АКАДЕМИЯ РУМЫНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ

# ТРУДЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ЭНЕРГЕТИКЕ

Том IV, № 3 Июль—сентябрь 1956

## СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

К. АПЕТРЕЙ и С. ФАУР, Насущные исследовательские задания в области энергетики . . . . . 183

*ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА*

В. НИТУ, Математическое выражение надежности эксплоатации электрических систем . . . . . 189

*ТЕРМОЭНЕРГЕТИКА И ТЕРМОТЕХНИКА*

В. ПИМСНЕР и А. К. ВАСИЛЕСКУ, Влияние некоторых функциональных и конструктивных параметров на газоструйный компрессор, работающий на природных газах . . . . . 207

А. К. ВАСИЛЕСКУ, В. ПИМСНЕР и П. СВОРОНОС, К вопросу о разработке природных газов путем использования газоструйного компрессора . . . . . 219

*ТЕРМИЧЕСКИЕ МАШИНЫ*

А. К. ВАСИЛЕСКУ и В. ПИМСНЕР, Влияние тощих дозировок на характеристику мощности двигателей с зажиганием искрой, работающих на жидком топливе, при переключении на природные газы . . . . . 243

*ТВЕРДОЕ ТОПЛИВО*

И. БЛУМ и сотрудники, Химико-технологическое исследование торфов РНР. Сообщение II. Механическая обработка и использование химико-технологических процессов на торфе РНР . . . . . 265

*ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА*

П. АНДРОНЕСКУ, Система мер как составная часть системы величин . 281

К. АПЕТРЕЙ и М. ЭЛЕФТЕРЕСКУ, Электродинамические модели электроэнергетических систем. Моделирование синхронных генераторов . . 311

Ф. МАНЯ, Предельные условия статической устойчивости электроэнергетических систем . . . . . 329

*ЗАМЕТКИ* . . . . . 347

*АВТОРЕФЕРАТЫ* . . . . . 363

*РЕЦЕНЗИИ* . . . . . 381

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ РУМЫНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 3, 1956

# SARCINI DE CERCETARE ACTUALE ÎN DOMENIUL ENERGETICII

DE

C. APETREI şi S. FAUR

Congresul al II-lea al P.M.R. stabileşte sarcini importante cu privire la dezvoltarea economiei naţionale în al doilea plan cincinal; Directivele Congresului prevăd „dezvoltarea cu prioritate a industriei mijloacelor de producţie şi îndeosebi a acelor ramuri ale industriei grele care au asigurată baza de materii prime în ţară: industria petrolului, chimică, energetică, siderurgică, metalelor colorate, cărbunelui".

În mod deosebit în Directivele Congresului se subliniază necesitatea dezvoltării industriei extractive; în acest scop se prevăd pentru al doilea plan cincinal creşterea, în comparaţie cu 1955, a producţiei: de ţiţei cu 28%, de cărbune cu 80—90%, de gaz metan de 2,6 ori, iar producţia gazelor de sondă urmează să atingă 2,3 miliarde $m^3$ în 1960 etc.

O asemenea dezvoltare a industriei extractive în cel de al doilea plan cincinal este determinată de dezvoltarea în ansamblu a economiei naţionale; ţiţeiul cu produsele sale, cărbunele, ca şi gazele — metan şi de sondă — urmînd să servească atît ca materii prime într-o serie de ramuri industriale (chimia, siderurgia etc.) *cît şi ca resurse energetice primare pentru producerea de căldură şi energie mecanică.*

Din analiza sarcinilor pe care le pune Congresul al II-lea în domeniul industriei extractive şi a creării bazelor energetice ale economiei naţionale, în cel de al doilea plan cincinal, cît şi într-o următoare perioadă — 15—20 ani — se pot desprinde următoarele caracteristici deosebite:

*a*) Dezvoltarea bazelor energetice ale economiei naţionale — producere de căldură şi energie mecanică — este intim legată şi determinată de dezvoltarea industriei extractive; *în dezvoltarea de ansamblu a economiei naţionale, dezvoltarea bazei energetice trebuie să premeargă pe aceea a celorlalte ramuri industriale.*

*b*) O caracteristică a produselor industriei extractive — ţiţei, cărbune, gaze — o constituie calitatea lor de a putea fi utilizate atît ca materii prime, pentru diferite ramuri industriale, cît şi ca resurse în producerea de energie — căldură şi energie mecanică. Mai mult, tehnica modernă,

în ultimii 10 ani, pune pe ordinea de zi problema utilizării complexe, energotehnologică, a resurselor naturale.

De asemenea, trebuie avut în vedere că unui aceluiași produs al industriei extractive dîndu-i-se utilizare în scopuri energetice diferite se obțin randamente deosebite.

Deci o justă valorificare a produselor industriei extractive necesită o anumită politică energetică în cadrul general al politicii economice.

*c*) Nevoile crescînde de energie pot fi acoperite atît prin combustibili minerali, cît și prin valorificarea resurselor hidroenergetice în centrale hidro-electrice ; valorificarea minereurilor de uraniu și toriu în cadrul centralelor atomo-electrice oferă de asemenea largi posibilități pentru dezvoltarea bazelor electroenergetice ale țării noastre în viitorul apropiat.

*d*) Din examinarea consumurilor specifice de combustibil și energie electrică în industrie, transporturi, consum casnic etc. consumuri valabile pentru etapa actuală de dezvoltare a economiei naționale, reiese că valorile acestor consumuri sînt foarte ridicate în comparație cu aceleași consumuri realizate în U.R.S.S., alte țări de democrație populară și unele state capitaliste, cum ar fi S.U.A., Belgia etc.

Valorile ridicate ale consumurilor de energie în țara noastră se datoresc atît stării utilajului energetic și metodelor tehnologice folosite în economia noastră națională, cît și unei politici energetice de economie a combustibilului și energiei electrice, insuficient fundamentată tehnic și științific.

Această situație dă totodată indicații și asupra rezervelor importante avute în resursele energetice secundare și asupra avantajelor economice ale utilizării lor ; este cunoscut că *obținerea unei tone combustibil* convențional din resurse secundare față de o aceeași cantitate de combustibil obținută din resurse primare, pe lîngă avantaje economice, prezintă și avantajul unei conservări a acestora din urmă.

Caracteristicile subliniate mai sus și anume faptul că *dezvoltarea bazelor energetice trebuie să premeargă dezvoltarea celorlalte ramuri ale economiei naționale*, faptul că *produsele industriei extractive pot fi utilizate în scopuri diferite* — energetice, chimice, tehnologice etc. — *cu randamente și rezultate economice deosebite, existența resurselor hidroenergetice și a rezervelor minerale de uraniu și toriu ce pot fi utilizate în producerea energiei electrice, existența unor mari posibilități de valorificare a resurselor energetice secundare și micșorare a consumurilor specifice de energie* ridică necesitatea punerii bazelor științifice a politicii economice și, în acest cadru, a politicii energetice în țara noastră.

*Fundamentarea științifică a unei juste politici energetice este cu atît mai necesară, cu cît rezervele resurselor energetice primare din țara noastră* comparativ cu alte țări, sînt relativ mici ; o analiză succintă a ultimelor date publicate în literatura de specialitate asupra rezervelor — cărbuni, petrol, gaze naturale, energie hidraulică — exprimate pe cap de locuitor, arată că țara noastră se situează mai departe în rîndul țărilor sărace ale lumii.

În lumina necesității fundamentării unei juste politici energetice se impune o scurtă analiză a stadiului problemei în țara noastră.

Dacă se analizează stadiul cunoașterii și inventarierii resurselor energetice primare de interes național — se exceptează resursele energetice

locale : turbă, deşeuri, energie eoliană etc., se poate constata pe diferite resurse existente următoarea situaţie :

a. *Resurse minerale — în care se încadrează combustibilii minerali (cărbuni, ţiţei, gaze) şi minereul de uraniu.* S-au ocupat de inventarierea zăcămintelor şi a resurselor respective, Comitetul geologic, Ministerul Minelor, Ministerul Petrolului, primul în special în zone noi, neexplorate sau slab explorate, ultimele intensificînd exploatarea unor zăcăminte mai mult sau mai puţin cunoscute.

Deşi în ultimul timp explorările geologice pentru depistarea rezervelor şi resurselor minerale s-au dezvoltat în mare măsură, totuşi, dat fiind că pe de o parte mai sînt teritorii ale ţării puţin sau de loc explorate, iar pe de altă parte că forarea s-a limitat la adîncimi cu mult inferioare posibilităţilor tehnice actuale, nu se dispune în prezent de o situaţie suficient de exactă asupra resurselor şi rezervelor minerale din ţara noastră. Mai mult, lipsesc studii calitative la zi asupra resurselor minerale avute şi care să fixeze utilizarea lor tehnică cea mai indicată. Singurul studiu în acest domeniu este cel elaborat de Institutul de energetică al Academiei R.P.R. asupra însuşirilor geologice, chimice şi chimico-tehnologice a cărbunilor din R.P.R.

b. *Resurse hidroenergetice.* Primele lucrări în această direcţie aparţin prof. Dorin Pavel şi prof. Leonida; aceste studii sînt incomplete, referindu-se în mod deosebit la potenţialul teoretic al rîurilor din ţara noastră.

În ultima perioadă Institutul de studii şi proiectări energetice al MEEIE şi Direcţia generală hidrometeorologică din Ministerul transporturilor au întreprins studii ample pentru stabilirea potenţialului hidroenergetic, economic amenajabil, pentru bazinele rîurilor importante din R.P.R., acţiune ce în prezent este executată în proporţie de 80—85%.

Studiile respective n-au fost întreprinse însă pe baza unei metodologii ştiinţifice anterior elaborată, durata şi numărul înregistrărilor făcute sînt insuficiente ; de asemenea cu totul insuficiente sînt studiile geologice referitoare la locurile indicate pentru amenajări hidroenergetice etc. Aşadar, datele obţinute în acest domeniu pot fi recunoscute ca juste numai într-o primă apreciere.

c. *Resurse vegetale.* Deşi fondul nostru forestier este poate singurul bine cunoscut şi complet inventariat, totuşi avînd în vedere greutatea specifică actuală a acestei resurse în balanţa energetică generală a ţării — 5% în 1955 — şi tendinţa de continuă descreştere — 3,5 % în 1960 — cunoaşterea acestei resurse nu prezintă decît un interes minor în stabilirea resurselor energetice primare din ţara noastră.

În domeniul cunoaşterii consumurilor de energie şi al dinamicii acestor consumuri în diferite ramuri industriale, transporturi, consum casnic, agricultură etc. s-a făcut cu mult mai puţin decît în privinţa cunoaşterii resurselor energetice primare ale ţării noastre.

Începuturile făcute de Institutul de energetică al Academiei R.P.R., I.S.P.E. etc., în vederea stabilirii consumurilor de energie şi a dinamicii acestora, sînt cu totul insuficiente şi nu corespund necesităţilor ce stau în faţa elaborării politicii noastre energetice.

Studii aprofundate, bazate pe cercetări cu privire la justa utilizare a resurselor minerale, hidraulice etc., nu au fost elaborate pînă în prezent ;

lipsesc studiile tehnico-economice, care pe baza studierii geografice a resurselor naturale, a caracteristicilor calitative ale acestora, a investițiilor și cheltuielilor de utilizare în moduri diferite, de exploatare și transport, să stabilească modul indicat de valorificare a bogățiilor noastre naturale.

În legătură cu reducerea consumurilor specifice de energie, de valorificare a resurselor energetice secundare și îmbunătățire a randamentului global al instalațiilor energetice, s-au făcut unele cercetări, ca de pildă cele duse de Institutul de energetică al Academiei R.P.R., privind normarea consumurilor specifice de energie electrică și termică în industrie, termoficarea în R P R., recuperările la cuptoare prin recirculația gazelor de ardere etc. Deși s-a trecut de asemenea chiar la generalizarea anumitor acțiuni pe întreaga economie națională — reducerea consumului specific de energie — acțiunile respective sînt totuși cu totul insuficiente; ele sînt limitate, se ocupă uneori de cazuri particulare, extinderea lor este împiedicată de lipsa aparatajului de măsură necesar, etc.

Pe baza celor expuse mai sus se pot face cîteva observații:

*a*) Deși sînt unele începuturi, acțiunile duse pentru cunoașterea resurselor energetice naturale, pentru stabilirea consumurilor specifice de energie, pentru valorificarea resurselor energetice secundare sînt cu totul insuficiente pentru fundamentarea unei juste politici economice pe baze științifice; preocupările în aceste domenii în țara noastră sînt cu mult în urmă față de preocupările și rezultatele obținute în străinătate, pe plan național și internațional.

*b*) Se manifestă în cadrul acestor preocupări lipsa unei orientări unitare în atacarea problemelor; atacarea lor fragmentară, fără discernămînt în privința importanței lor, izolat de către fiecare for științific sau departament pentru domeniul său de activitate. Se resimte lipsa de colaborare între diferite foruri și inexistența unui for coordonator și îndrumător.

*c*) Lipsa unei fundamentări științifice a politicii energetice în țara noastră fără o suficientă perspectivă duce la adoptarea unor soluții de moment, pe parcurs.

Atenția multor foruri de conducere a politicii noastre economice se îndreaptă aproape exclusiv asupra electroenergeticii care este confundată curent cu energetica (dacă se ia de exemplu anul 1953 se observă că în balanța energetică mondială energia electrică nu era reprezentată decît de 5%, fapt care indică importanța ei limitată în comparație cu energia utilizată sub formă mecanică sau căldură în industrie, transporturi, agricultură etc.).

Pentru remedierea celor semnalate, în cele ce urmează se vor schița obiectivele mai importante pentru fundamentarea științifică a politicii energetice în țara noastră:

Obiectivul principal trebuie să conste în stabilirea în etape succesive, de o precizie din ce în ce mai mare, a balanței energetice globale a R.P.R. pe o perioadă de cel puțin 15—20 de ani, cu aprecieri de principiu asupra dezvoltării de perspectivă.

Această acțiune trebuie să fie începută în primul rînd cu inventarierea și interpretarea tehnică și economică a posibilităților de utilizare a resurselor noastre energetice.

Un al doilea obiectiv important ar consta în valorificarea resurselor energetice secundare, îmbunătățirea randamentului global al instalațiilor energetice, reducerea consumului specific de energie etc.

Pentru realizarea acestor obiective ar urma să se cerceteze

a. *Resursele energetice*

— inventarierea resurselor energetice ale țării noastre și stabilirea rezervelor de diferite categorii;

— cercetarea lanțurilor energetice, din punctul de vedere al soluțiilor tehnice și al randamentelor energetice;

— stabilirea indicilor e onomici caracteristici utilizării diferitelor resurse energetice, în procesul de transport și transformare;

— studiul criteriilor tehnico-economice pentru stabilirea soluțiilor energetice posibile.

b. *Consumurile de energie*

— cercetări asupra consumului global de energie realizat la noi în țară și străinătate;

— studii asupra dinamicii consumului global de energie, funcție de natura energiei și a consumatorului.

c. *Valorificarea rațională a resurselor energetice naturale*

— dinamica utilizării potențialului hidroenergetic din R.P.R.;

— cercetări privind amplasarea marilor consumatori de energie față de sursele energetice primare;

— cercetări privind utilizarea energetică și chimico-energetică a gazului metan în condițiile țării noastre;

— cercetări privind valorificarea cărbunilor noștri, din punctul de vedere al utilizării lor în scopuri chimice, tehnologice și energetice;

— studii privind stabilirea raportului optim între puterile centralelor termoelectrice și hidroelectrice;

— cercetări privind producerea energiei electrice în cadrul centralelor atomo-electrice într-o perioadă imediată și în perspectivă;

— cercetări privind transportul de energie electrică în condițiile din R.P.R.;

d. *Valorificarea resurselor energetice secundare și îmbunătățirea randamentului instalațiilor energetice*

— cercetări privind posibilitățile tehnico-economice de recuperare a pierderilor de căldură în industrie;

— reducerea consumurilor specifice de energie în industrie;

— rolul termoficării în dezvoltarea bazelor energetice din R.P.R.

e. *Relativ la balanțe energetice*

— studii privind balanțele energetice globale ale țării în ultimul timp (primul și al doilea plan cincinal);

— studii privind întocmirea balanțelor energetice globale în intervale de timp bine determinate, 5 sau 10 ani, în diferite variante de utilizare a resurselor primare.

S-au arătat mai sus schematic obiectivele care ar trebui realizate în fundamentarea științifică a politicii energetice la noi în țară; dată fiind complexitatea problemei, aspectele și multilateralitatea sarcinilor ce derivă, îndeplinirea lor în bune condiții depinde în cea mai mare măsură de modul cum se organizează acțiunea, de studiu și cercetare, de modul cum se urmărește desfășurarea ei.

Declanşarea acestei acţiuni de importanţă naţională va da posibilitatea fundamentării ştiinţifice a politicii energetice promovate şi va conduce la o justă valorificare a resurselor energetice din ţara noastră.

## НАСУЩНЫЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ЗАДАНИЯ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГЕТИКИ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

В свете постановлений II съезда Румынской Рабочей партии, касающихся развития народного хозяйства, проводится краткий анализ исследования по вопросу о задачах в области научного обоснования энергетической политики в РНР. На основании этого анализа даются некоторые указания в связи с важнейшими насущными исследовательскими заданиями по энергетике.

## TÂCHES ACTUELLES DE LA RECHERCHE DANS LE DOMAINE DE L'ÉNERGÉTIQUE

(RÉSUMÉ)

Dans l'esprit des décisions du 2e Congrès du Parti Ouvrier Roumain concernant le développement de l'économie nationale, on fait une analyse succinte de l'étude des préoccupations dans le domaine des bases scientifiques de la politique énergetique en R.P.R. Se fondant sur cette analyse, on donne certaines indications sur les importantes tâches actuelles de la recherche et de l'étude dans le domaine de l'énergétique.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 3, 1956

*ENERGETICĂ GENERALĂ*

# EXPRIMAREA MATEMATICĂ A SIGURANŢEI ÎN EXPLOATARE A SCHEMELOR ELECTRICE

DE

V. NITU

Electrificarea ţării noastre şi dezvoltarea industriei grele într-un ritm necunoscut Romîniei burghezo-moşiereşti necesită o siguranţă tot mai mare în alimentarea cu energie electrică.

Funcţionarea fără avarii este sarcina de bază a unităţilor noastre energetice, constituind indicele calitativ al activităţii lor. Pentru realizarea acestei sarcini se cere contribuţia egală a organizaţiilor de proiectare, de montaj şi exploatare. Atîta timp cît proiectantul va da scheme simple, capabile să izoleze rapid locul avariat, iar organizaţiile de montaj şi exploatare vor ridica nivelul muncii de execuţie şi întreţinere, se va contribui efectiv la micşorarea numărului de avarii. Pe de altă parte, mărirea siguranţei se realizează prin asigurarea unei rezerve de putere, prin dublarea anumitor elemente ale sistemului care alimentează consumatorii importanţi, cît şi prin introducerea pe scară largă a protecţiei şi automatizării.

În consecinţă problema livrării energiei electrice fără întrerupere prezintă două aspecte :

1) Determinarea numărului probabil de întreruperi în alimentarea unui anumit consumator, în consecinţă, determinarea cantităţii probabile de energie nelivrată consumatorului respectiv.

2) Determinarea rezervei. Prin aceasta se înţelege rezerva de putere care trebuie avută la ieşirea din funcţiune a unui generator şi rezerva diverselor elemente ale schemei care să permită ca, în caz de avarii, să nu se întrerupă alimentarea cu energie.

Pînă acum, în proiectarea sistemelor energetice, alegerea schemelor şi determinarea rezervei de putere s-au apreciat ca probleme separate, fără a se scoate în evidenţă legătura organică care există între ele. Astfel sînt cazuri cînd există o suficientă rezervă de putere, însă din cauză că problema schemelor şi a rezervei s-au studiat izolat, puterea avută în rezervă nu poate fi folosită integral, din cauza strangulării în diferitele elemente ale schemei.

În afară de aceasta, rezolvarea acestor probleme se bazează pe afirmații generale, care de obicei depind de experiența proiectantului și prin urmare, nu pot fi obiectiv justificate.

Adesea se întîmplă, din lipsa unei analize obiective, să se creeze rezerve la diferite elemente cu o siguranță superioară în exploatare, ceea ce cere investiții suplimentare (ex. transformatorii) iar alte elemente mai puțin sigure să fie lăsate fără rezervă (cabluri, linii etc.). Pe de altă parte intervin numeroși factori, care nu se pot exprima prin relațiile matematice obișnuite și de aceea s-a recurs la calculul probabilităților.

În U.R.S.S. aplicarea calculului probabilităților în diferitele domenii ale tehnicii a luat o mare extensiune.

Astfel, în anul 1932, inginerul sovietic R. A. Ferman a propus aplicarea calculului probabilităților în diferite probleme ale exploatării sistemelor energetice. Mai tîrziu, prof. P. G. Grudinski a reluat problema indicînd calea calculării numărului de întreruperi în schemele electrice.

Analizînd însă schemele electrice numai sub aspectul numărului de întreruperi nu se obține o imagine completă asupra siguranței unei scheme, fiindcă pe lîngă numărul de avarii are o influență sensibilă timpul mediu de întrerupere și în consecință cantitatea energiei nelivrate.

Astfel trei întreruperi la un cablu de 6—10kV reprezintă o întrerupere medie de 60 de ore, iar la o linie electrică aeriană similară 9 ore.

Însă nici cantitatea de energie electrică nelivrată întreprinderilor diferite ca proces tehnologic, nu poate fi luată sub aspectul cifric, întrucît costul kWh nelivrat variază în limite foarte largi, în funcție de caracterul întreprinderii.

Din estimarea concretă, exprimată sub formă bănească, a pierderilor ce le suportă economia națională, în urma avariilor probabile ce pot avea loc, se pot prevedea măsuri care să mărească siguranța în alimentare a diverșilor consumatori în funcție de procesul tehnologic.

Aceasta se poate realiza atît prin dublarea anumitor elemente ale schemei cît și prin automatizarea schemei, cum ar fi de pildă folosirea reanclanșării automate care la cabluri poate reduce numărul avariilor pînă la 50%, iar la linii aeriene pînă la 75%.

Punerea în balanță a pagubelor pe care le-ar suporta întreprinderea respectivă, în consecință economia națională, prin neprevederea de măsuri speciale care să limiteze numărul întreruperilor și volumul investițiilor care ar fi necesare pentru realizarea unui anumit grad de siguranță, creează o imagine concretă și edificatoare asupra oportunității anumitor măsuri care pot contribui la micșorarea numărului de întreruperi.

Aprecierea obiectivă a siguranței în exploatare a schemelor electrice se poate face matematic și anume prin calculul probabilităților. Aceasta nu înseamnă că rezultatul determinării siguranței în exploatare a schemelor electrice, ar reprezenta într-o formă indirectă planificarea avariilor și ar putea sluji ca justificare în acest scop.

Calculele ce se fac se încadrează într-o metodă unitară care permite compararea obiectivă a diferitelor variante ce se studiază. Calculul este simplu și cere timp relativ puțin, dînd în schimb o imagine completă a siguranței schemelor ce se analizează.

Pentru aplicarea practică a calculului probabilităților la aprecierea siguranței în exploatare a schemelor electrice, sînt necesare date statistice, din care să se poată determina numărul probabil de avarii anual și timpul mediu de întrerupere pentru fiecare element al sistemului.

Statistica avariilor care se face de către inspecțiile de avarii din M.E.E.I.E. este folosită mai mult pentru măsuri organizatorice imediate, fără a constitui o bază pentru diferitele modificări pe care trebuie să le aducă proiectarea în vederea prevenirii, în noile scheme, a avariilor similare.

Statistica avariilor trebuie să fie cunoscută de un cerc cît mai mare de energeticieni și în primul rînd de proiectanți și executanți.

Funcționarea sistemelor energetice constituie verificarea experimentală a schemelor ce se proiectează și în consecință cunoașterea statisticii avariilor acestor scheme capătă o importanță deosebită.

Folosirea acestor date și aplicarea unei metode obiective matematice în scopul determinării siguranței în exploatare a schemelor electrice, reprezintă un instrument util pentru cei ce studiază problema schemelor.

## I. NOȚIUNILE DE BAZĂ ALE CALCULULUI PROBABILITĂȚILOR UTILIZATE ÎN DETERMINAREA SIGURANȚEI ÎN EXPLOATARE A SCHEMELOR ELECTRICE

Deși sarcina de bază a unităților energetice o constituie exploatarea fără avarii, totuși practica confirmă existența unor avarii de care trebuie ținut seamă.

A neglija acest element înseamnă a rupe proiectarea de practică și în consecință a elimina unul din factorii activi care pot stimula continua perfecționare a diferitelor scheme fie ele electrice, termice sau telefonice.

Ca o justificare a aplicării calculului probabilităților în determinarea siguranței în exploatare a schemelor electrice, servește următorul raționament : menirea de bază a unei scheme electrice o constituie alimentarea fără întrerupere a consumatorilor ; cu toate acestea, în sistemele energetice apar anumite fenomene neprevăzute, de natură să întrerupă total sau parțial alimentarea consumatorilor.

Astfel de fenomene în teoria probabilităților se numesc evenimente. Însuși faptul apariției acestor evenimente în lucrul sistemelor, avînd un caracter neregulat, constituie baza aplicării calculului probabilităților.

### 1. Evenimente întîmplătoare și neîntîmplătoare

Manifestarea fenomenelor neîntîmplătoare are loc pe baza anumitor legi, care acționează în mod constant în împrejurările date, condiționînd astfel decurgerea procesului respectiv. Fenomenele care se desfășoară pe baza anumitor legi pot fi din vreme prevăzute.

Fenomenele întîmplătoare nu decurg dintr-o necesitate, adică în anumite împrejurări pot avea loc sau pot lipsi. Astfel, de exemplu, în timp de furtună liniile aeriene pot fi lovite de trăsnet și pot în același timp să nu fie lovite. De asemenea este un element întîmplător și porțiunea de linie care poate fi lovită.

### 2. Frecvența evenimentelor întîmplătoare

Se numește frecvența unui eveniment raportul dintre cantitatea cazurilor manifestării evenimentului respectiv și numărul de încercări. Dacă din $N$ experiențe (de pildă transformatori în funcțiune), un eveniment s-a verificat de $M$ ori (adică $M$ transformatori au fost avariați), raportul $\frac{M}{N}$ dă frecvența corespunzătoare apariției evenimentului considerat în seria de experiențe făcute (frecvența avarierii unui transformator).

Experiența arată că la un număr mare de încercări, frecvența relativă a repetării unui eveniment întîmplător este stabilă. Astfel, în lucrările de specialitate se arată că la aruncarea unei monede de 1200 de ori, experiența constînd în ieșirea unei anumite fețe, a reieșit o frecvență relativă de 0,5016, iar la aruncarea monedei de 2400 de ori — 0,5005. După cum se vede, frecvența are un caracter experimental.

### 3. Noțiunea de probabilitate

Exemplul dat în paragraful anterior servește ca o ilustrare a faptului că gradul de manifestare a unui eveniment întîmplător, adică probabilitatea sa este o proprietate ob ectivă, care se manifestă prin stabilitatea frecvenței relative a repetării evenimentului întîmplător, atunci cînd se fac mai multe încercări.

Astfel, dacă totalitatea încercărilor se reprezintă prin $N$ și evenimentul $A$ care ne interesează pe noi reprezintă $M$ cazuri, atunci probabilitatea evenimentului $A$ este egală cu raportul dintre numărul $M$ și totalul încercărilor $N$. Numărul $N$ poate reprezenta întrerupătorii în funcțiune într-o anumită perioadă, iar $M$ avariile pentru aceeași perioadă.

Aceasta se exprimă astfel: $P(A) = \frac{M}{N}$, unde $P$ indică probabilitatea evenimentului $A$.

Măsura obiectivă a posibilității de manifestare a evenimentului întîmplător este probabilitatea sa.

Noțiunea teoretică de probabilitate nu poate fi despărțită de noțiunea de frecvență, care este un fapt experimental. De aici rezultă că baza teoriei matematice a probabilităților o constituie lumea reală, practica, iar în cazul nostru funcționarea sistemelor energetice. Probabilitatea ca și frecvența relativă este o mărime fără dimensiuni, permițînd astfel să se compare posibilitatea de manifestare a evenimentelor întîmplătoare de diferite naturi.

## II. REGULILE CALCULULUI PROBABILITĂȚILOR

### 1. Probabilitatea unui eveniment întîmplător este un număr pozitiv $P(A) \geqslant 0$

Probabilitatea este egală cu zero, atunci cînd nici o încercare nu favorizează evenimentul respectiv (de exemplu, cînd într-o schemă nu există

nici un transformator, iar încercarea constă tocmai în avarierea unui transformator). Astfel de evenimente, a căror probabilitate este egală cu zero, se numesc imposibile.

### 2. Probabilitatea unui eveniment întîmplător nu depășește unitatea $P(A) \leqslant 1$

Probabilitatea este egală cu 1 atunci cînd toate încercările favorizează evenimentul studiat (de exemplu, cînd într-o porțiune de schemă cuprinzînd întrerupători și linii, încercarea constă în avarierea simultană a acestor elemente).

În calculele siguranței în exploatare a schemelor electrice vom întîlni, de pildă, cazuri cînd probabilitatea avarierii anuale a unui element este mai mare decît 1.

Astfel, de exemplu, pentru o linie aeriană lungă de 200 km, probabilitatea întreruperilor anuale este egală cu 2 (vezi tabloul din p. 196). Aceste cifre nu trebuie înțelese în sensul că, la un moment dat, într-un sistem energetic sînt mai multe avarii, decît elemente, ci în sensul că probabilitatea avarierii elementului respectiv se referă la un număr mai mare de încercări (o încercare constă în funcționarea elementului respectiv la un moment dat).

Astfel de evenimente a căror probabilitate este egală cu 1 se numesc evenimente sigure.

### 3. Adunarea probabilităților

Problema constă în determinarea apariției unui eveniment compus din două sau mai multe evenimente incompatibile (adică la o încercare numai un eveniment poate apărea),

De pildă, în schema prezentată în figura 1 considerăm că ne interesează numai porțiunea care cuprinde barele colectoare, separatorii și întrerupătorii. Evenimentul care ne interesează este probabilitatea avarierii unui întrerupător ($I$) sau separator ($S$). Presupunem că din separatori, $K$ sînt avariați, iar dintre întrerupători, $L$ sînt avariați (pentru bare excludem posibilitatea avariilor).

Întrucît suma întrerupătorilor și separatorilor este egală cu $N$, atunci probabilitatea căutată va fi

$$P(I \text{ sau } S) = \frac{K+L}{N}. \tag{1}$$

Însă $\frac{K}{N}$ reprezintă probabilitatea avarierii unui separator, iar $\frac{L}{N}$ probabilitatea avarierii unui întrerupător, raportate la numărul total de elemente.

Expresia (1) poate fi redată și în felul următor :

$$P(I \text{ sau } S) = P(I) + P(S). \tag{2}$$

Relația obținută exprimă regula de adunare a probabilităților apariției unui eveniment din două incompatibile și este egală cu suma pro-

babilităților lor. Această regulă a adunării probabilităților se extinde la orice număr de evenimente incompatibile

$$P(A_1 \text{ sau } A_2 \text{ sau} \ldots A_n) = P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) + \ldots P(A_n). \quad (3)$$

Relația (3) se poate aplica circuitelor serie în care este suficient ca un singur element să fie avariat pentru ca să se întrerupă total livrarea energiei electrice prin schema respectivă.

### 4. Regula înmulțirii probabilităților

Vom deduce regula înmulțirii probabilităților din următorul exemplu dat în teoria calculului probabilităților : considerăm două urne, conținînd fiecare $N$ bile, din care $M$ negre iar restul albe ; problema constă în a găsi probabilitatea de a scoate simultan două bile negre. Probabilitatea de a scoate o bilă neagră din fiecare urnă separat este egală cu $\frac{M}{N}$.

Experimental s-a dovedit că probabilitatea de a scoate simultan două bile negre este egală cu produsul probabilităților luate separat $\left(\frac{M}{N}\right)^2$.

Numărul coincidențelor scoaterii a două bile negre, după ce toate bilele au fost scoase, este egal cu probabilitatea coincidenței de a scoate două bile negre, înmulțită cu numărul total de bile, adică $\left(\frac{M}{N}\right)^2 N$.

În consecință, probabilitatea coincidenței a două evenimente întîmplătoare ($A$ și $B$) este egală cu produsul probabilităților lor

$$P(A \text{ și } B) = P(A) \,.\, P(B). \quad (4)$$

Regula înmulțirii probabilităților poate fi extinsă la orice număr de evenimente : $A_1$, $A_2$, . . . ,$A_n$

$$P(A_1 \text{ și } A_2 \text{ și } A_3 \text{ și } \ldots A_n) = P(A_1) \,.\, P(A_2) \ldots, P(A_n). \quad (5)$$

Relațiile obținute pot fi aplicate circuitelor paralele ; presupunem două circuite paralele și că probabilitatea de întrerupere a unuia este egală cu $P(A)$, iar a altuia cu $P(B)$, probabilitatea întreruperii simultane a ambelor circuite, în ipoteza că durata medie a fiecărei întreruperi este egală cu $t$, conform relațiilor stabilite, va fi

$$P(A \text{ și } B) = P(A) \,.\, P(B). \, t. \quad (6)$$

Formula de mai sus trebuie să reprezinte numărul probabil de întreruperi simultane a celor două circuite. În cazul de față $t$ reprezintă durata medie a întreruperilor la circuitul unde această valoare este mai mare.

Pentru a ne convinge că formula (5) exprimă tot numărul de întreruperi anual, observăm că :

$$P(A).P(B).t = \frac{\text{număr de întreruperi } (A)}{\text{an}} \cdot \frac{\text{număr de întreruperi } (B)}{\text{an}} \cdot \text{fracțiuni de an.}$$

Presupunem că în locul bilelor avem perioadele de avarii cu durata $t$($B$—1). Numărul anual al perioadelor este egal cu $\frac{1}{t}$, din care $P(A)$ sau $P(B)$ sînt probabilitățile de avariere pentru cele două linii paralele.

Considerăm că cele două linii sînt identice și, în consecință $P(A)=P(B)$. Probabilitatea ca avariile pe cele două linii să coincidă este similară scoaterii a două bile negre din cele două urne și poate fi astfel exprimată :

$$\left(\frac{P(A)}{\frac{1}{t}}\right)^2 . \tag{7}$$

Numărul anual de coincidențe a avariilor pe cele două linii va fi

$$\left(\frac{P(A)}{\frac{1}{t}}\right)^2 . \frac{1}{t} \text{ adică } \frac{P(A)^2 \cdot t}{8760} \tag{8}$$

($t$ este exprimat în fracțiuni de an).

Din expunerea sumară a noțiunilor de bază a calculului probabilităților, rezultă că teoria probabilităților nu are ca obiect esența fizică a diferitelor evenimente întîmplătoare, ci numai relațiile cantitative între probabilitățile lor. Teoria probabilităților precizează regulile care permit ca pe baza probabilităților unor evenimente întîmplătoare să se calculeze probabilitatea unor evenimente mai complexe.

## III. DATELE STATISTICE ASUPRA DIFERITELOR ELEMENTE DIN SISTEMELE ENERGETICE

În calculele siguranței în exploatare a schemelor electrice sînt necesare următoarele date asupra avariilor :

1) Numărul de avarii, care atrag după sine întreruperea alimentării cu energie, pentru fiecare element în parte și care se exprimă prin raportul dintre numărul de avarii anual și numărul de elemente de un anumit fel aflat în funcțiune.

2) Timpul mediu de întrerupere, în caz de avarie, pentru fiecare element în parte, considerat din momentul începerii avariei și pînă la restabilirea alimentării cu energie electrică.

Întrucît la noi datele statistice asupra avariilor prezintă și unele contradicții, cum ar fi aceea că un generator, care are și părți rotative, este mai sigur în exploatare decît un transformator, vom folosi pentru exemplele de calcul, datele publicate în literatura sovietică, pe care le redăm în tablou. În analiza statisticii asupra avariilor prezintă deosebit interes sistematizarea cauzelor care au determinat diversele avarii, în vederea luării de măsuri concrete care să ducă la înlăturarea lor.

Din tabloul următor rezultă că gradul de siguranță diferă de la element la element și, în consecință nu este necesar ca proiectarea să se orienteze spre crearea de rezerve la elementele cu o siguranță mare (transformatori, bobine de reactanță etc.) deoarece asupra siguranței unei scheme au influență hotărîtoare elementele mai puțin sigure ca : linii aeriene, cabluri, întrerupători.

Din analiza datelor statistice prezentate în tablou rezultă unele concluzii importante pentru proiectare.

1) Conform datelor prezentate în literatura sovietică, reiese că transformatorul este mai sigur în exploatare de aproximativ 14 ori față de generator. Datele prezentate de statistica noastră asupra avariilor transformatorilor și generatorilor nu sînt însă semnificative.

*Tablou*

| Denumirea | Unit. de măsură | Cantitatea | Probabilitățile avarierii anuale ($p$) | Timpul mediu de întrerupere (ore) | Se avariază anual un element din : |
|---|---|---|---|---|---|
| Generator . . . . . | buc. | 1 | 0,07 | 35 | 14 buc. |
| Transformator . . . . . | „ | 1 | 0,005 | 10 | 200 „ |
| Întrerupători 110 kV | „ | 1 | 0,015 | 8 | 66 „ |
| Întrerupători 35 kV . . | „ | 1 | 0,01 | 7 | 100 „ |
| Întrerupători 6—10 kV . | „ | 1 | 0,0025 | 6 | 400 „ |
| Bobine de reactanță . . . | „ | 1 | 0,00035 | 6 | 2857 „ |
| Separatori . . . . . | „ | 1 | 0,00022 | — | 4545 „ |
| Linii 110 kV . . . . . | km | 1 | 0,01 | 5 | 100 km |
| Linii 35 kV . . . . . | „ | 1 | 0,015 | 3 | 66 „ |
| Linii 35 kV (linii cu un singur stîlp) . . . . . | „ | 1 | 0,025 | 3 | 40 „ |
| Cabluri 6—10 kV . . . . | „ | 1 | 0,02 | 20 | 50 „ |

Plecînd de la datele statisticii sovietice rezultă că în stațiile ridicătoare și coborîtoare nu este necesară introducerea rezervei în transformatori din considerente de siguranță în exploatare. În acest sens numărul transformatorilor poate fi limitat, maximum la 2. Pentru stațiile de puteri mici apare oportună instalarea unui singur transformator, cu condiția ca în cadrul sistemului respectiv să existe un transformator mobil în rezervă.

2) Atît din tablou cît și din statistica noastră se desprinde că liniile aeriene și cablurile au o probabilitate de avariere aproximativ de același ordin, însă durata avarierii la cabluri este de aproximativ 6 ori mai mare ca la liniile aeriene, ceea ce ne face să conchidem că liniile aeriene au o siguranță mai mare în exploatare.

La cabluri locul cel mai expus defectelor îl reprezintă mufele de legătură.

În Uniunea Sovietică în prescripțiile de reconstrucție a rețelelor orășenești, se recomandă să se instaleze linii aeriene în locul cablurilor pentru orașele a căror clădiri nu depășesc 4—5 etaje.

Introducerea liniilor aeriene în electrificarea orașelor, pe lîngă că reprezintă o alimentare mai sigură, este o soluție economică (cu atît mai mult cu cît acum se trece la introducerea cablurilor de aluminiu care au o siguranță scăzută în exploatare).

3) Din tablou rezultă că bobina de reactanță este mai sigură în exploatare de circa 7 ori față de întrerupători, la aceeași tensiune.

Acest fapt contrazice principiul alegerii schemei de montare a bobinelor în plecări, conform căruia întrerupătorul se montează între bare și bobine, iar puterea sa de rupere se alege, ținînd seama de puterea de

rupere de după bobină. În lumina acestor date trebuie revăzută și această schemă.

4) În aprecierea schemelor viitoare, datelor asupra avariilor li se poate aplica un oarecare corectiv, care să exprime creșterea siguranței în exploatare a elementelor sistemului respectiv.

5) Din statistica noastră reiese că stațiile fără personal sînt considerabil mai sigure în exploatare, comparativ cu stațiile cu personal permanent.

Această situație, extrem de importantă pentru proiectare, a condus în Uniunea Sovietică la hotărîrea de a se trece la construirea de stații fără personal de exploatare, ceea ce reprezintă esențiale avantaje economice.

## IV. APLICAREA METODEI CALCULULUI PROBABILITĂȚILOR LA APRECIEREA SIGURANȚEI DIFERITELOR SCHEME

Din analiza sumară a noțiunilor de bază a calculului probabilităților rezultă că, folosind datele statistice asupra avariilor și aplicînd regulile calculului probabilităților, se poate aprecia în mod obiectiv siguranța în exploatare a oricărei scheme electrice. Metoda folosită constă în aplicarea regulii de adunare a probabilităților pentru circuitele serie și pentru schemele cu protecție diferențială a barelor colectoare și a regulii de înmulțire pentru circuitele paralele.

Etapele de calcul, așa cum s-a arătat în prima parte a articolului, constau în determinarea următoarelor mărimi:

1) $A_{\Sigma}$ — numărul probabil de întreruperi în alimentarea cu energie electrică a consumatorului, pentru o anumită perioadă $T$.

2) $D_{\Sigma}$ — durata probabilă de întrerupere a alimentării cu energie, pentru o anumită perioadă $T$.

3) $E_{\Sigma}$ — cantitatea de energie nelivrată consumatorului în perioada $T$.

Deoarece compararea diferitelor variante, din punct de vedere al cheltuielilor de exploatare, în mod obișnuit, se face pentru 10 ani, perioada pentru care vor fi calculate mărimile de mai sus va fi luată de asemenea egală cu 10 ani.

Pentru ușurința calculului separăm schemele electrice în două categorii:

### a. *Schemele care pot fi calculate cu ajutorul regulii de adunare a probabilităților*

După cum s-a arătat în cadrul expunerii noțiunilor de bază a calculului probabilităților, regula adunării privește evenimentele incompatibile, adică în cazul nostru, acele scheme în care avarierea unui element atrage după sine întreruperea alimentării consumatorilor racordați la schema respectivă.

Pentru ilustrarea mai clară a aplicării acestei reguli vom porni de la o schemă concretă, arbitrar aleasă (fig. 1, schema unei centrale).

În calcul plecăm de la următoarele considerații asupra schemei:

*a*) Protecția acționează fără refuz și selectiv.

*b*) Barele colectoare sînt echipate cu protecție diferențială incompletă, adică cu acționarea numai asupra întrerupătorilor de la surse, în cazul unui scurt circuit în zona ei de acțiune.

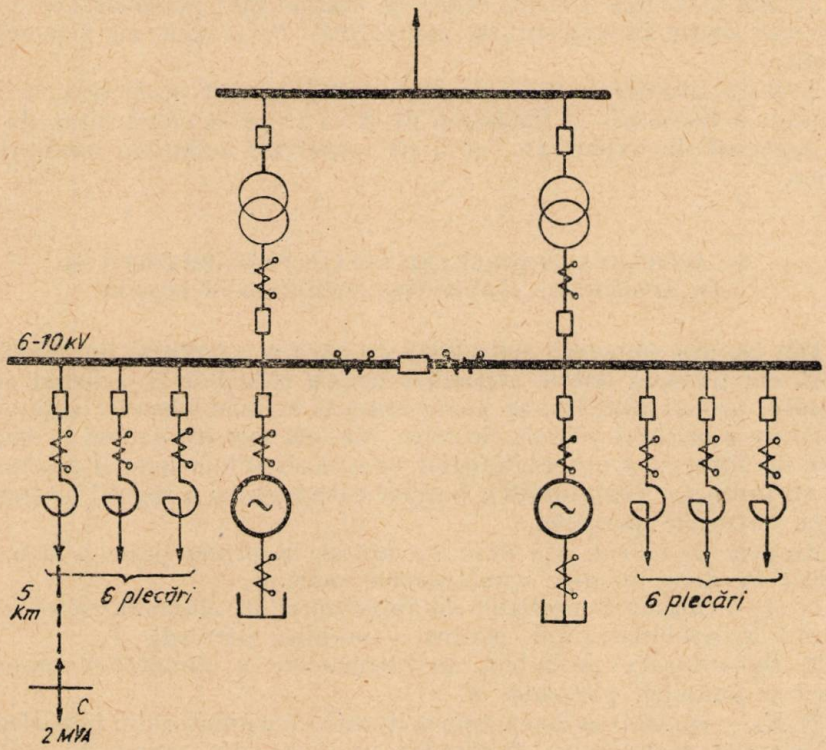



Fig. 1

Se are în vedere că întrerupătorii din plecări sînt în zona de protecție. Presupunem de asemenea că numai jumătate din avariile întrerupătorilor fac să acționeze protecția, restul avariilor fiind de natură mecanică și nu se iau în considerare.

Din analiza schemei din figura 1 rezultă că provocarea unei avarii la întrerupătorii de pe plecări, întrerupătorul din cupla longitudinală, separatorii de bare, bobinele de reactanță, atrage după sine acționarea protecției diferențiale incomplete. Cît privește alimentarea consumatorilor, aceasta poate fi întreruptă și din cauza separatorilor de pe plecări sau a cablului respectiv.

Numărul probabil de întreruperi pentru astfel de scheme va fi

$$A_{\Sigma} = [K_1 \ (N_1 M \ A_{\text{într.}} + N_2 \ A_{\text{bobine}} + N_3 A_{\text{sep.}}) + K_2 L A_{\text{cablu}}] \ T \qquad (9)$$

unde $A$ reprezintă probabilitatea avarierii fiecărui element în parte;

$N$ — numărul de elemente analoge;

$L$ — lungimea cablului;

$M$ — factorul care ia în considerare la întrerupători procentul de avarii din considerente mecanice;

$K$ — indicele de automatizare a schemei ($K_1$ reprezintă procentul de reanclanșări automate reușite la barele colectoare, iar $K_2$ reprezintă numărul de reanclanșări automate reușite la întrerupătorii din plecări). În schemele fără dispozitive de reanclanșare automată $K = 1$.

Folosind datele din tabloul dat asupra avariilor găsim că numărul probabil de întreruperi în alimentarea unei astfel de scheme pentru o perioadă de 10 ani va fi:

$$A_\Sigma = (17.0{,}0025.0{,}5 + 8.0{,}00035 + 32.0{,}00022 + 5.0{,}02)10 = 1{,}3109$$

Durata totală de întrupere pentru perioada considerată va fi:

$$D_\Sigma = [K_1 (N_1 A_{\text{într.}} T_{\text{într.}} + N_2 A_{\text{bobine}} T_{\text{bobine}} + N_3 A_{\text{sep.}} T_{\text{sep.}}) + K_2 L A_{\text{cablu}} T_{\text{cablu}}] T, \quad (10)$$

unde $T_{\text{într.}}$, $T_{\text{bobine}}$, $T_{\text{sep.}}$, $T_{\text{cablu}}$ — reprezintă timpul mediu de întrerupere. Făcînd înlocuirile corespunzătoare găsim

$D_\Sigma = (0{,}02125.6 + 0{,}0028.6 + 0{,}00704.2.0{,}1.20)10 = 21{,}4326$ ore.

Cunoscînd numărul și durata totală a întreruperilor se trece la ultima fază a calculului și anume, determinarea cantității de energie nelivrată, folosind relația:

$$E_\Sigma = D_\Sigma . P_m \frac{T_m}{8760}, \quad (11)$$

în care

$P_m$ este puterea maximă cerută de consumator;

$T_m$ — timpul de utilizare a puterii maxime.

În acest caz cantitatea de energie nelivrată va fi:

$$E_\Sigma = 21{,}4326.3500 \frac{5000}{8760} = 4286{,}2 \text{ kWh}.$$

În funcție de felul consumatorului (cuptoare electrice, uzine metalurgice, chimice etc.) se pot calcula pierderile aduse economiei naționale din cauza avariilor.

Să analizăm un alt exemplu (fig. 2).

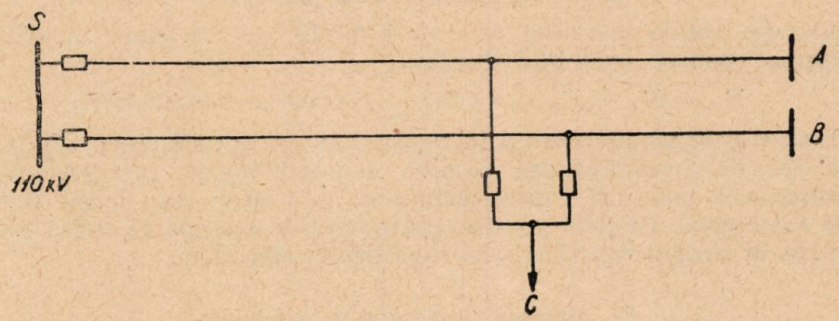



Fig. 2

Consumatorul $A$ este alimentat de la stația $S$, unde sînt în total 6 plecări și sosiri, printr-o linie de 140 km, 110 kV.

Puterea medie consumată la stația $A$ este de 10 000 kW. Să determinăm cantitatea de energie neprimită de consumatorul $A$ din cauza diferitelor avarii.

Numărul probabil anual de întreruperi

$$A_\Sigma = 6.\ 0{,}015 + 70.0{,}01 + 75\ .\ 0{,}01 = 1{,}54.$$

Întrucît stația este prevăzută cu protecție diferențială, care acționează direct asupra întrerupătorilor, suma probabilităților lor de întrerupere va intra în calculul siguranței în exploatare a fiecărei linii.

Durata anuală a întreruperilor :

$$D_\Sigma = 6.\ 0{,}015\ .8 + 1{,}45\ .5 = 7{,}97 \text{ ore.}$$

Cantitatea de energie anuală nelivrată consumatorului C va fi :

$$E_\Sigma = 7{,}97.10\ 000 = 79\ 700 \text{ kWh.}$$

Pentru o perioadă de 10 ani cantitatea de energie se ridică la cifra de 79 7000 kWh. În vederea măririi siguranței în exploatare a consumatorului $A$ este necesar ca în punctul $C$, liniile de 110 kV să fie legate după o schemă care să separe avariile pe cele două porțiuni. În felul acesta avariile pe porțiunea $S—C$ nu atrag după sine întreruperea alimentării consumatorului A.

Din acest exemplu se desprinde că montarea unor întrerupători în punctul C este recuperată de cantitatea de energie primită de consumatorul $A$ (energia nelivrată din cauza avariilor are prețul de imputare superior prețului de vînzare), prin ridicarea siguranței transportului de energie către punctul $A$.

Pentru a primi o imagine completă a siguranței unei scheme, este necesar a lua în considerare și scoaterea în reparație a diferitelor elemente. Pentru consumatorii alimentați fără rezervă, scoaterea în reparație înseamnă energie nelivrată. Astfel, pentru a exprima în cifre acest lucru vom ține seama de elementul cu durata cea mai mare de reparație din circuitul respectiv. În exemplul prezentat în figura 1, dacă considerăm întrerupătorul cu durata cea mai mare de reparație (8 ore), energia nelivrată va fi :

$$E_R = 10.\ 8.2000 = 160\ 000 \text{ kWh.}$$

Energia totală nelivrată în decurs de 10 ani din cauza avariilor și reparațiilor pentru exemplul 1 este :

$$E_T = E_A + E_R = 48\ 452 + 160\ 000 = 208\ 452 \text{ kWh.}$$

Pentru schema prezentată în figura 2 se poate ca factorul $E_R$ practic să fie nul, dacă presupunem că linia se poate repara sub tensiune, iar întrerupătorul poate fi șuntat printr-un separator care leagă linia de barele colectoare. În felul acesta transportul de energie electrică nu este întrerupt în timpul reparării întrerupătorului sau liniei.

### b. *Schemele care pot fi calculate cu ajutorul regulii de înmulțire a probabilităților*

Așa după cum s-a arătat mai sus, regula înmulțirii (formula (6)) exprimă probabilitatea coincidenței a două sau mai multe avarii din circuite para-

lele, sau probabilitatea coincidenței avariilor la toate elementele legate în serie. Pentru a ilustra aceasta vom analiza schema prezentată în figura 3.

În calcul vom ține seama de următoarele considerente :

*a*) Liniile de 110 kV sînt echipate cu dispozitive de reanclanșare automată trifazică, care acționează cu succes în 75% din cazuri.

*b*) Barele colectoare de 110 kV au protecție diferențială cu acționare la declanșare pentru toate avariile din zona de acționare a protecției. În acest caz presupunem că jumătate din avariile întrerupătorilor sînt de natură mecanică. Barele nu sînt prevăzute cu R.A.R.

*c*) Toată puterea dezvoltată de centrală este transmisă stației coborîtoare prin cele două circuite ale liniei de 110 kV.

*d*) Numărul de ore de utilizare a vîrfului maxim poate fi apreciat la 6000 de ore.

*e*) Pentru linie se presupune că reparațiile se fac sub tensiune.

Din cele de mai sus reiese că în aprecierea siguranței în exploatare a schemelor, intervin numeroși factori care trebuie introduși în calcul.

Pentru schemele cu circuite paralele (fig. 3), folosind expresia (8) și considerînd protecția și automatizarea schemei, numărul de întreruperi se determină după relația

$$A_{\Sigma} = \left[ \frac{A^2_{\text{bloc}}\, T_{\text{bloc}}}{8760} + K_1 (N_1 M\, A_{\text{într.}} + N_2 A_{\text{sep.}}) + \right.$$

$$\left. + (K_2\, A_{\text{linie}})^2 \frac{T_{\text{linie}}}{8760} + K_1 (N_3\, M\, A_{\text{într.}} + N_4\, A_{\text{sep.}}) \right] T. \qquad (12)$$

Înlocuind valorile în expresia (12) numărul de întreruperi în alimentarea stației coborîtoare 110/6 kV din figura 3 va fi :

$$A_{\Sigma} = 10 \left[ \frac{0{,}095^2 .35}{8760} + (5.0{,}5.0{,}0015 + 5.0{,}00022) + \right.$$

$$\left. + (0{,}25)^2 \frac{5}{8760} + (6.0{,}5.0{,}015 + 6.0{,}00022) \right] = 0{,}0849773.$$

În această expresie nu s-au luat în considerare avariile turbinei și cazanului (considerînd funcționarea bloc a cazanului, turbinei și generatorului) din lipsă de date verosimile asupra avariilor cazanului și turbinei.

Determinarea duratei de întrerupere pentru schemele cu circuite paralele se face înmulțind fiecare membru al expresiei (12) cu timpul mediu de întrerupere respectiv, astfel obținem :

$$D_{\Sigma} = \left[ \frac{A^2_{\text{bloc}}\, T^2_{\text{bloc}}}{8760} + K_1 (N_1\, M\, A_{\text{într.}}\, T_{\text{într.}} + N_2 A_{\text{sep.}}\, T_{\text{sep.}}) + \right.$$

$$\left. + (K_2 A_{\text{linie}})^2 \frac{T^2_{\text{linie}}}{8760} + K_1 (N_3 M\, A_{\text{într.}}\, T_{\text{într.}} + N_4 A_{\text{sep.}}\, T_{\text{sep.}}) \right] T. \qquad (13)$$

Făcînd înlocuirile în expresia de mai sus, care are un caracter general, pentru cazul concret prezentat în figura 3, durata de întrerupere pentru perioada considerată de 10 ani va fi egală cu 6,61 ore.

Energia nelivrată pentru această perioadă, considerînd numai întreruperile provenite de la avarii, este

$$E_{\Sigma} = D_{\Sigma} \cdot P \frac{T_M}{8760} = 6{,}61.50\,000 \frac{6000}{8760} = 266\,382 \text{ kWh}.$$

Influența reparațiilor asupra siguranței în exploatare pentru circuitele paralele, se ia în considerare, în măsura în care prin intrarea în reparație

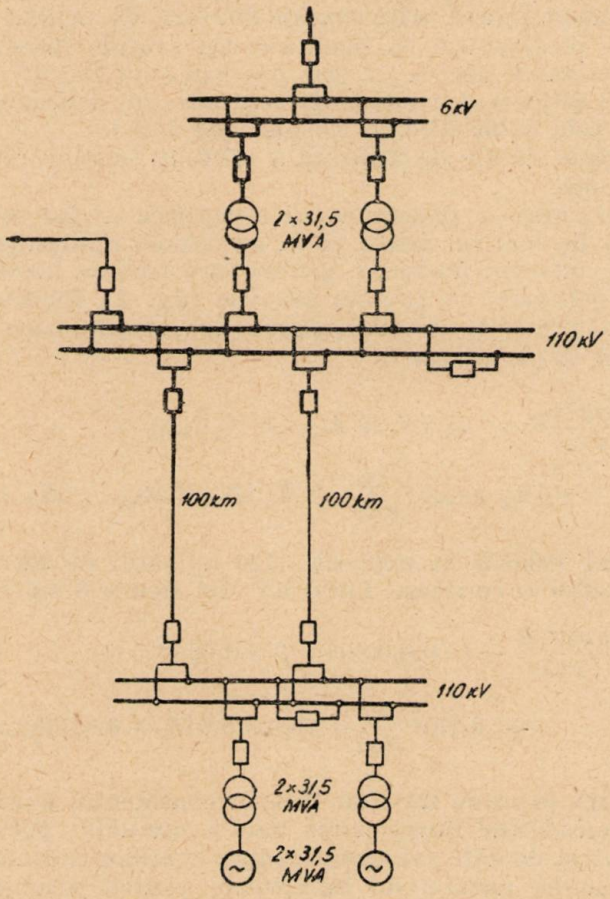



Fig. 3

a unui element, există pericolul întreruperii transportului de energie electrică prin schema respectivă.

Menționăm că datele asupra avariilor diferitelor elemente nu se referă la un an calendaristic, ci la perioada de funcționare dintr-un an.

Durata de întrerupere a circuitului rămas în funcțiune din cauza avariilor în perioada de reparație, poate fi determinat după formula :

$$D_{\Sigma} = A_F \cdot T_F \frac{T_{\text{rep.}}}{8760} N_T, \qquad (14)$$

unde

$A_F$ — numărul de întreruperi al circuitelor rămase în funcțiune;
$T_F$ — timpul mediu de întrerupere;
$T_{rep.}$ — timpul necesar reparațiilor;
$N_T$ — numărul de ani pentru care se calculează siguranța schemei.

Pentru a lua în considerare și cantitatea de energie nelivrată din cauza avariilor, presupunem că reparațiile în rețea nu pot fi puse în concordanță cu reparațiile la consumator.

În acest caz energia nelivrată, atît din cauza avariilor cît și a reparațiilor, trebuie scoasă în evidență în mod separat

$$E_T = E_1 + E_R. \tag{15}$$

În această formulă trebuie considerate două elemente distincte:

1) Timpul scoaterii în reparație a unui circuit.

2) Timpul de întrerupere determinat de avariile care pot avea loc la circuitele rămase în funcțiune în perioada de reparație a primului circuit.

Aplicînd expresia (15) la condițiile schemei din figura 3 energia nelivrată din motive de avarii și reparații va fi

$$E_T = 226\,385 + 2\,050\,000 = 2\,276\,385 \text{ kWh}.$$

Aceste cifre arată importanța pe care o are scurtarea timpului de reparații în sistemele electrice pentru mărirea siguranței în alimentarea consumatorilor.

## CONCLUZII

1. În vederea aprecierii obiective a siguranței în exploatare a schemelor electrice fără a le încărca cu aparate inutile, din considerente de siguranță, este necesară folosirea unei metode matematice, care constă în utilizarea calculului probabilităților și datelor asupra avariilor din sistemele energetice.

2. Aprecierea siguranței în exploatare a schemelor electrice, pe baza teoriei probabilităților, se poate face cu calcule simple, folosind operația de adunare a probabilităților pentru schemele unde avarierea unui element din schemă atrage după sine întreruperea alimentării cu energie electrică a întregii scheme și operația de înmulțire a probabilităților pentru schemele cu circuite paralele (avarierea unui element nu atrage după sine întreruperea alimentării cu energie electrică prin schema respectivă).

3. Pe lîngă determinarea numărului de întreruperi, pentru a avea o imagine completă a siguranței schemelor, mai sînt necesare următoarele mărimi:

*a*) Durata medie de întreruperi pe perioada considerată (de ex. 10 ani).

*b*) Cantitatea totală de energie nelivrată din cauza avariilor.

*c*) Pagubele cauzate economiei naționale din cauza întreruperilor alimentării cu energie electrică, exprimate în formă bănească.

4. În vederea determinării elementelor folosite în calculul siguranței în exploatare a schemelor sînt necesare date statistice asupra avariilor

din sistemele energetice, care trebuie sistematizate pentru determinarea următoarelor elemente :

*a*) Probabilitatea de avariere a fiecărui element, dedusă din raportul dintre numărul avariilor anuale şi numărul de elemente de acelaşi gen aflat în funcţiune $\left(p = \frac{N_{\text{avarii}}}{M_{\text{elemente}}}\right)$.

*b*) Timpul mediu de întrerupere, care se defineşte ca diferenţa dintre momentul începerii avariei şi momentul restabilirii alimentării cu energie electrică (nu se ia în considerare timpul necesar pentru executarea reparaţiei elementului avariat).

5. Pentru a evidenţia efectul economic al siguranţei schemelor electrice sînt necesare cunoaşterea timpului de utilizare a puterii maxime a consumatorului respectiv şi preţul energiei nelivrate din cauza avariei.

În acest scop este necesar ca pentru fiecare grup de întreprinderi (chimice, petrolifere, metalurgice, alimentare, textile, comerciale etc.) să se stabilească preţul kWh nelivrat. Se vor lua în considerare toate elementele care conduc la stagnarea producţiei din lipsă de energie electrică.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛОАТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

### (КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

В статье указывается важность математического выражения надежности эксплуатации электрических систем при помощи вычисления вероятностей.

В СССР вычисление вероятностей было впервые применено в энергетике в 1921 году инженером Р. А. Ферманом. Впоследствии, проф. П. С. Грудинский вновь занялся изучением проблемы и указал способ расчета числа выключений в электрических системах.

Вслед за изложением основных положений вычисления вероятностей, необходимых для определения надежности электрических систем, выводятся соответствущие математические зависимости.

В эти зависимости вводятся специальные коэффициенты, учитывающие как род используемой защиты, так и степень автоматизации системы.

В статье предлагается, чтобы наряду с числом выключений рассчитывать также и среднюю продолжительность выключения, а равно и количество недоставленной потребителю энергии. Зная стоимость недостаяленной вследствие аварий энергии, по каждой группе предприятий (металлургических, химических, нефтяных и пр.), можно выразить вышеупомянутые выключения в денежных единицах.

Таким образом могут быть сопоставлены убытки, которые понесло бы народное хозяйство вследствие непредусмотрения особых мероприятий (скорая защита, автоматизация и т.д.) и необходимые капиталовложения для различных изменений в системе с целью уменьшения этих убытков.

Для определения надежности электрических систем, необходимы статистические данные относительно аварий, случающихся в энергетических системах страны указывающие вероятность аварии каждого элемента системы, а также и среднюю продолжительность выключения.

# EXPRESSION MATHÉMATIQUE DE LA SÉCURITÉ D'EXPLOITATION DES SCHÉMAS ÉLECTRIQUES

(RÉSUMÉ)

On montre, dans le présent article, l'importance de l'expression mathématique de la sécurité d'exploitation des schémas électriques, obtenue à l'aide du calcul des probabilités.

En U.R.S.S., le calcul des probabilités a été utilisé pour la première fois en énergetique, en 1932, par l'ingénieur R. A. Ferman. Ultérieurement, le professeur P.S. Groudinschi a repris le problème et a indiqué le moyen de calculer le nombre d'interruptions dans les schémas électriques.

Après avoir exposé les notions fondamentales du calcul des probabilités, nécessaires pour la détermination de la sécu ité des schémas électriques, on passe à l'établissement des relations mathématiques nécessaires à ce but.

On introduit dans ces relations des coefficients spéciaux qui tiennent compte tant de la nature de la protection utilisée, que du degré d'automatisation du schéma.

On propose, dans cet article, de calculer, en sus du nombre d'interruptions, la durée moyenne d'interruption ainsi que la quantité d'énergie non livrée. Connaissant pour chabue groupe d'entreprises (métallurgiques, chimiques, pétrolières, etc.) la valeur de l'énergie non livrée à cause d'avaries, on peut exprimer sous forme pécuniaire les interruptions du schéma.

En procédant de cette manière on peut comparer les dommages que devrait supporter l'économie nationale par défaut de prévision de mesures spéciales (protection rapide, automatisation, etc.), avec les fonds à investir pour différentes modifications à apporter au schéma, en vue de diminuer ces dommages.

Pour déterminer la sécurité des schémas électriques il est nécessaire d'avoir des données statistiques sur les avaries dans nos systèmes énergétiques, comprenant la probabilité d'avarie de chaque élément et le temps moyen d'interruption.

## BIBLIOGRAFIE

1. Baptidanov L. N. i Tarasov V. I., *Oborudovanie elektriceskih stanții i pod stanții.* GEI, Moscova, 1954, p. III.
2. Berstein S. N., *Teoria veroiatnosti.* ONTI, Moscova, 1954.
3. Grudinschi P. G., *Scheme kommutații elektriceskih stanții i podstanții.* GEI, 1948.
4. Mihoc G., *Elemente de calculul probabilităților.* Ed. tehnică, București, 1954.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 3, 1956

*TERMOENERGETICĂ ŞI TERMOTEHNICĂ*

# INFLUENŢA UNOR PARAMETRI FUNCŢIONALI ŞI CONSTRUCTIVI ASUPRA COMPRESORULUI CU JET DE GAZE NATURALE

DE

VICTOR PIMSNER şi ADRIAN CĂLIN VASILESCU

În cadrul Institutului de energetică se studiază de cîţiva ani problema utilizării energetice a gazelor naturale.

Unul din obiectivele colectivului de lucru reprezintă studierea aplicării compresorului cu jet de gaze naturale, în scopul exploatării cîmpurilor de gaze naturale. Primele rezultate experimentale cu un compresor realizat au fost prezentate, indicîndu-se şi calea de urmat în experimentări.

În acest an, colectivul de lucru şi-a propus să studieze un aparat astfel proiectat încît să folosească determinării unei serii de parametri care nu pot fi stăpîniţi pe cale de calcul şi asupra cărora nu se cunosc suficiente date experimentale.

Compresorul cu jet construit lucrează între presiunile :

| | |
|---|---|
| — presiune superioară | 93 kgf/cm$^2$ |
| — presiune joasă | 32 kgf/cm$^2$ |
| — presiune medie | 41 kgf/cm$^2$ |

şi din calcule [1], [2], [3] rezultă că va opera cu un coeficient de injecţie de

$$u = 0{,}75.$$

Autorii şi-au propus să determine următoarele elemente, ca urmare a experienţei căpătate cu lucrările de pînă în prezent şi care indică parametri de studiat :

— comportarea compresorului construit în condiţiile nominale ;

— comportarea compresorului construit în alte condiţii decît cele de calcul ;

— influenţa lungimii camerei de amestec asupra performanţelor compresorului ;

— influenţa formei camerei de amestec asupra performanţelor compresorului.

În acest scop, compresorul construit a avut o serie de particularităţi constructive şi a fost montat într-o instalaţie de experimentare.

Particularităţile constructive ale compresorului experimental sînt următoarele :

Compresorul este de tipul II (fig. 1), adică gazul de presiune superioară este destins pînă la presiune joasă, amestecarea făcîndu-se într-o cameră de amestec de contur apropiat de o semisferă. Gazul de înaltă presiune se destinde printr-un ajutaj supersonic, iar după amestecarea gazelor, acestea sînt comprimate într-un difuzor.

Pentru a se cerceta influenţa parametrilor constructivi, ajutajul de destindere s-a montat într-o piesă cu filet care permite să se aşeze ajutajul la diferite distanţe de intrarea în difuzor, variindu-se astfel lungimea de amestecare care în acest text se va denumi lungimea camerei de amestec. În felul acesta, s-a putut să se varieze poziţia duzei faţă de un reper fix, între − 8 mm şi + 40 mm (distanţa pozitivă corespunzînd înşurubării ajutajului în corpul port-ajutaj, adică lungirii camerei de amestec).

Pentru a se studia influenţa camerei de amestec, s-au cercetat trei camere de amestec interşanjabile ; aceste camere au avut element variabil secţiunea de intrare în difuzor, racordările la această secţiune şi la secţiunea difuzorului realizîndu-se pe cît se poate identic. Ca urmare a păstrării racordărilor şi a varierii secţiunii de intrare în difuzor, au rezultat distanţe diferite între ajutaj şi intrarea în difuzor pentru cele trei camere. S-a realizat (fig. 2) :

— camera nr. 1 cu secţiunea de intrare corespunzătoare calculelor ;

— camera nr. 2 cu secţiunea de intrare cu 15% mai mare ca a camerei nr. 1 şi cu secţiunea de intrare în difuzor cu 11 mm mai departe de ajutaj decît la camera nr. 1 ;

— camera nr. 3 cu secţiunea de intrare cu 150% mai mare decît cea calculată, ceea ce permite să aibă o porţiune dreaptă, iar distanţa secţiunii de intrare în difuzor faţă de ajutaj este identică cu cea de la camera nr. 2.

Pentru a se studia influenţa formei ajutajului s-au încercat patru tipuri de ajutaje supersonice şi unul sonic.

Rezultatele prezentate în acest articol se referă la ajutajul arătat în figura 3.

În scopul realizării condiţiilor variabile de experimentare, compresorul cu jet a fost încercat într-o instalaţie experimentală (fig. 4) pe teren, care permite măsurarea presiunii şi debitului de gaz pe toate cele trei conducte, cît şi varierea în limite largi a presiunii superioare şi în limite mai reduse a presiunii medii. S-a prevăzut şi încălzirea uşoară a gazului de înaltă presiune, pentru a preveni givrajul acestuia.

Parametrii variabili ai experimentărilor au fost :

— presiunea superioară (103, 96, 90, 80, 70 kgf/cm$^2$) ;

— presiunea medie (42, 41, 40, 39 kgf/cm$^2$) ;

— poziţia ajutajului faţă de intrarea în difuzor ;

— forma camerei de amestec.

În ansamblu, asupra preciziei experimentărilor se fac următoarele observaţii :

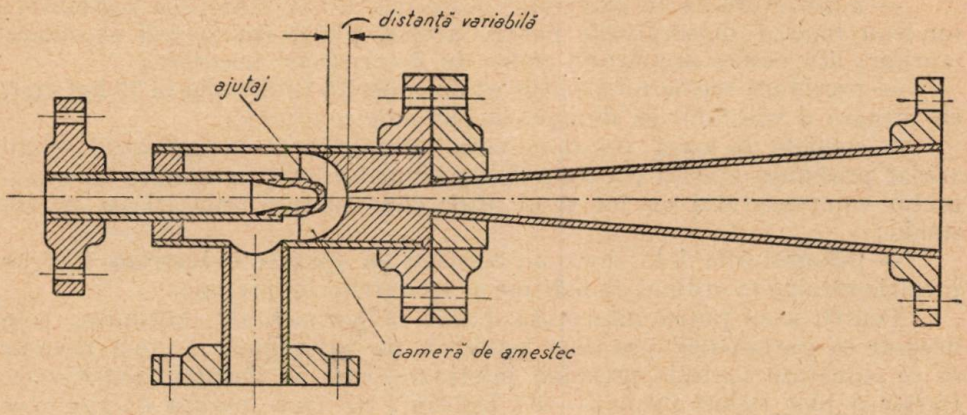



Fig. 1. — Schița compresorului cu jet de gaze naturale experimentat.

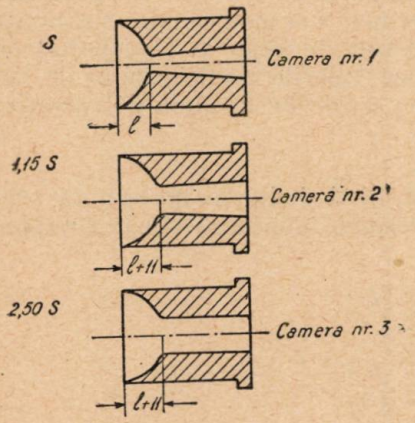



Fig. 2. — Camerele de amestec studiate.

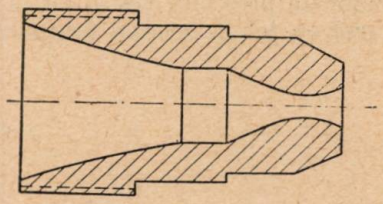


Fig. 3. — Forma ajutajului studiat.

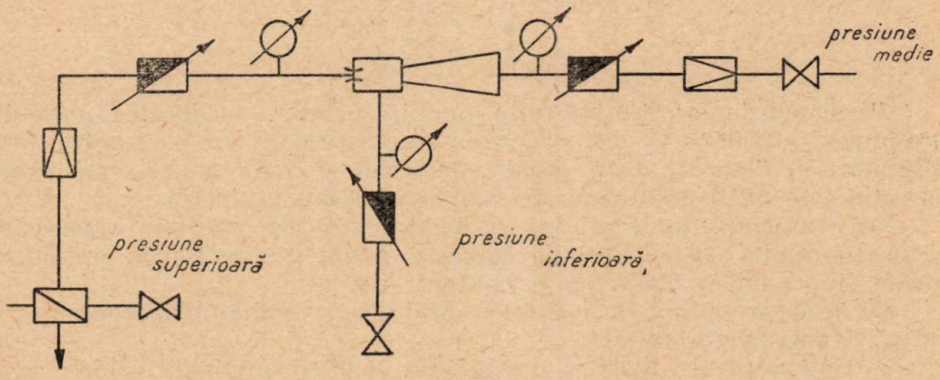



Fig. 4. — Instalația experimentală de încercat compresorul cu jet.

— măsurătorile s-au executat totdeauna după stabilirea regimului; nu s-au repetat măsurătorile pentru același punct (în scopul eliminării erorilor) din cauza numărului mare de determinări necesare;

— presiunea medie nu a putut să fie coborîtă totdeauna la 39 kgf/cm², ca urmare a presiunii ce domnea în această conductă;

— sondele de joasă presiune care alimentează compresorul și-au variat presiunea statică (în timpul experimentărilor), ca urmare a consumului compresorului cu jet și ai altor consumatori branșați pe aceste sonde;

— măsurătorile debitelor s-au efectuat cu aparate industriale a căror precizie rămîne în ordinul de mărime al aparatelor industriale.

Pentru a se putea interpreta datele experimentale obținute, este necesar ca parametrul presiune joasă să fie invariabil. A fost necesar să se corecteze variația presiunii inferioare, care în decursul experimentărilor a luat valori între 31—35 kgf/cm². Se face ipoteza că raportul coeficienților de injecție calculați în ipoteza gazelor ideale este egal cu raportul coeficienților de injecție reali, măsurați între aceleași presiuni. In consecință, se exprimă coeficientul de injecție, funcție de presiuni, făcîndu-se apel la ipotezele simplificatoare mai sus menționate, s-a notat cu „prim" valorile referitoare la coeficientul de injecție corespunzător presiunii joase de 32 kgf/cm² și fără indice valorile coeficientului de injecție măsurat pentru o anumită presiune; se obține formula de corecție,

$$u' = A\,u,$$

unde termenul de corecție $A$ are valoarea (fiind dedus în ipoteza că atît gazul de presiune înaltă cît și gazul de presiune inferioară vin la compresorul cu jet la aceeași temperatură):

$$A = \frac{0{,}894\sqrt{\dfrac{1-\left(\dfrac{p_i'}{p_s}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}}}{1-\left(\dfrac{p_i'}{p_m}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}}}-1}}{0{,}894\sqrt{\dfrac{1-\left(\dfrac{p_i}{p_s}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}}}{1-\left(\dfrac{p_i}{p_m}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}}}-1}}$$

Termenul de corecție pentru o anumită presiune medie în funcție de presiunea inferioară și pentru presiunile superioare ca parametru este prezentat în figura 5. Din această diagramă se observă că termenul de corecție este puțin influențat de valoarea presiunii superioare.

În consecință se neglijează influența variației presiunii superioare și se determină coeficientul de corecție numai în funcție de presiunea medie și presiunea joasă, ca parametru (fig. 6).

Ca urmare a prelucrării datelor obținute, se indică următoarele rezultate experimentale:

*a*) Compresorul construit prezintă în condiții nominale valori apropiate de valoarea rezultată din calcul, ceea ce justifică fondul teoretic

al problemei ; pentru o mai mare precizie în calcule, se cere o cercetare experimentală a coeficienţilor de calcul din formula coeficientului de injecţie.

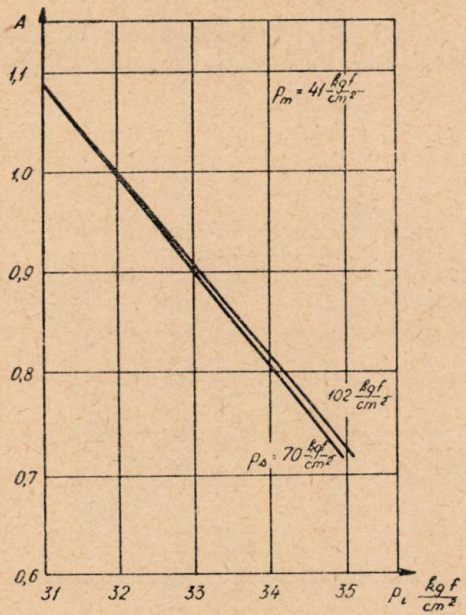



Fig. 5. — Influenţa presiunii superioare asupra termenului de corecţie.

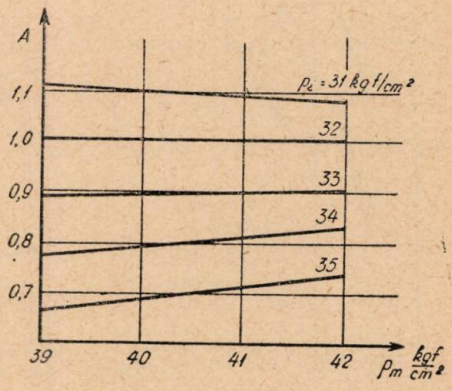



Fig. 6. — Valoarea termenului de corecţie $A$ folosit în corectarea coeficientului de injecţie.

**Valoarea coeficienţilor de injecţie (corectaţi) determinaţi experimental pentru valorile nominale**

($p_a$=93 kgf/cm²; $p_i$=32 kgf/cm²; $p_m$=41 kgf/cm²; $t$= 15°C ajutajul 2)

| Distanţa | Camera | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| — 8 | — | 0,90 | 0,82 |
| — 4 | 0,79 | 0,85 | — |
| 0 | 0,93 | 0,76 | 0,66 |
| 4 | 0,86 | 0,69 | 0,83 |
| 8 | 0,97 | 0,64 | 0,73 |
| 12 | 0,83 | 0,72 | 0,62 |
| 16 | 0,83 | 0,67 | 0,86 |
| 20 | 0,78 | 0,63 | 0,63 |
| 24 | 0,67 | 0,69 | 0,69 |
| 28 | 0,62 | 0,68 | 0,52 |
| 32 | 0,78 | 0,61 | 0,80 |

În tabloul de mai sus s-au indicat valorile măsurate şi raportate la condiţiile de calcul. Valorile mari faţă de valoarea de calcul (0,90) sînt puţin probabile şi trebuie interpretate ca o eroare de măsură. Totuşi, valoarea medie a valorilor măsurate dă

$$u = 0{,}745.$$

Valoarea medie de mai sus nu trebuie interpretată decît ca o confirmare a liniei generale de calcul şi nicidecum ca o justificare a coeficienţilor aleşi pentru calcul.

*b*) La alte regimuri decît cel de calcul [4], coeficientul de injecţie se micşorează dacă creşte presiunea medie sau dacă scade presiunea supe-

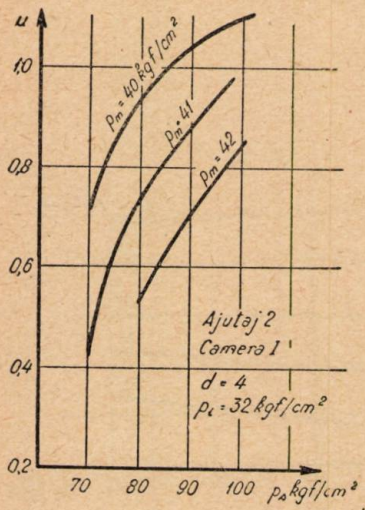



Fig. 7.— Influenţa variaţiei presiunii superioare şi a variaţiei presiunii medii asupra performanţelor compresorului experimentat.

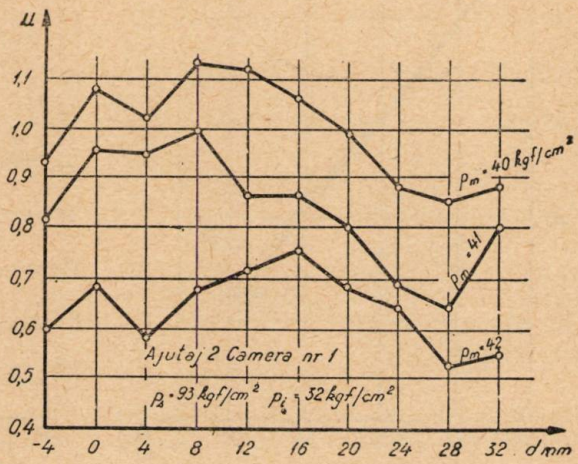



Fig. 8. — Influenţa parametrilor experimentaţi.

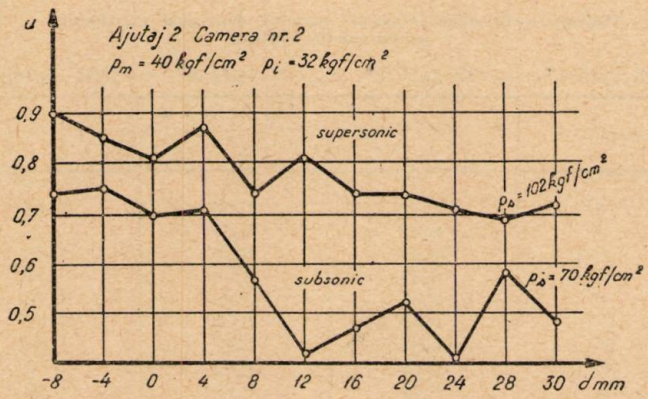



Fig. 9. — Variaţia coeficientului de injecţie pentru diferite lungimi de cameră pentru regimul supersonic şi subsonic.

rioară, deoarece lucrul mecanic necesar comprimării creşte în primul caz şi scade energia disponibilă pentru comprimare în al doilea caz. Se remarcă influenţa mai mare a creşterii presiunii medii decît a scăderii presiunii superioare (fig. 7), ca urmare a faptului că întregul amestec urmează a fi comprimat la presiune medie. Parametrii constructivi joacă rol în variaţia

coeficientului de injecție cu parametrii funcționali, așa cum se vede din figura 8, dedusă experimental.

*c*) Lungimea camerei de amestec are influență asupra performanțelor compresoru ui, ca urmare a condițiilor de amestecare ce le realizează [4]. Se remarcă de la început că forma camerei (secțiunea de intrare în difuzor) joacă un rol însemnat.

De asemenea joacă rol și parametrii funcționali ai compresorului, remarcîndu-se o interdependență între factorii amintiți.

Se remarcă astfel (fig. 9) că în momentul cînd — ca urmare a micșorării presiunii superioare — s-a trecut în domeniul subsonic, valorile măsurate sînt mult mai impre ise și variabile, ca în domeniul supersonic. Compresorul experimental funcționează prost dacă este adus să funcționeze în domeniul subsonic.

În ceea ce privește forma camerei de amestec, precum și influența ei asupra lungimii optime a camerei de amestec, se pot trage următoarele concluzii.

Camera nr. 1 arată că există o regiune optimă (fig. 10) a lungimii camerei de amestec, situată între distanțele 4 și 8 pentru regimul de calcul. O dată cu creșterea presiunii superioare, lungimea camerei se micșorează ca urmare a impulsului mare al gazelor la presiunea superioară.

O dată cu creșterea presiunii medii, lungimea optimă variază pentru ca impulsul gazelor de presiune superioară să fie corespunzător distribuit de gazele de joasă presiune, în scopul distribuirii energiei fără pierderi.

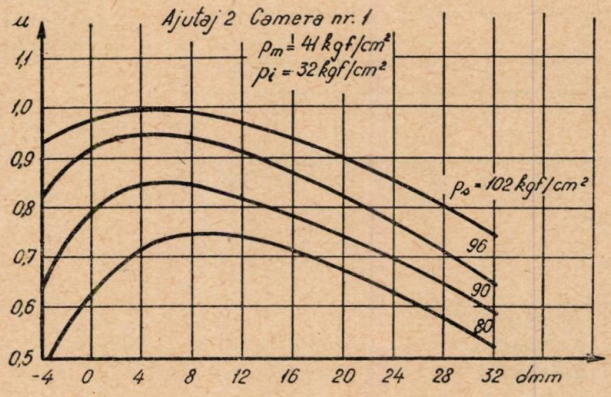



Fig. 10. — Influența lungimii camerei de amestec asupra coeficientului de injecție în cazul camerei nr. 1.

În ceea ce privește camera nr. 2 (fig. 11), rezultă din experimentări că variația lungimii camerei de amestec nu a fost suficientă pentru a se trage toate concluziile, liniile obținute avînd aspectul unor drepte de pantă descrescătoare, ca urmare a faptului că de la început această cameră era mai lungă.

În ceea ce privește camera nr. 3 (fig. 12) apare că lungimea camerei de amestec nu are influență asupra coeficientului de injecție, ceea ce este explicabil — în parte — prin faptul că în afară de camera de amestec

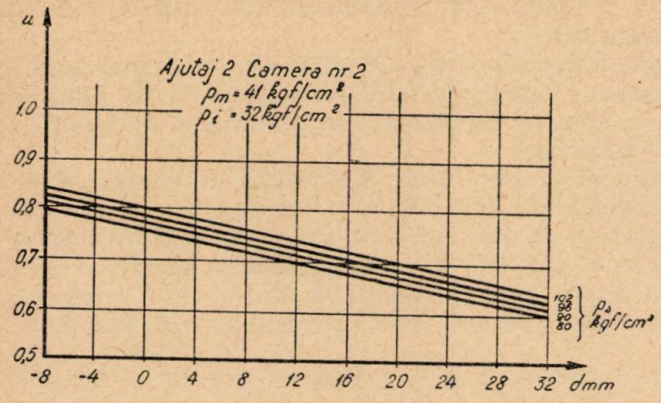



Fig. 11. — Influenţa lungimii camerei de amestec asupra funcţionării compresorului cu jet de gaze naturale, camera nr. 2.

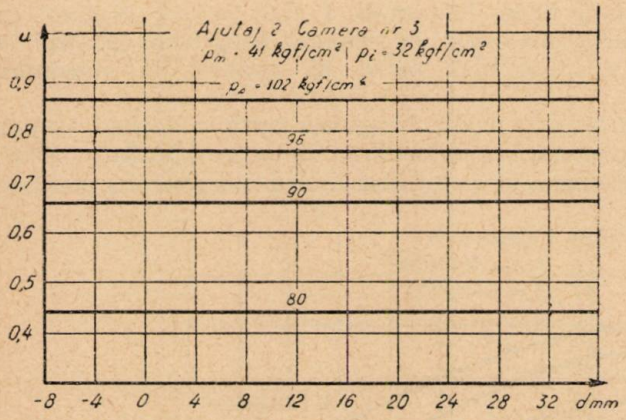



Fig. 12. — Influenţa lungimii camerei de amestec asupra funcţionării compresorului cu jet de gaze naturale, camera nr. 3.

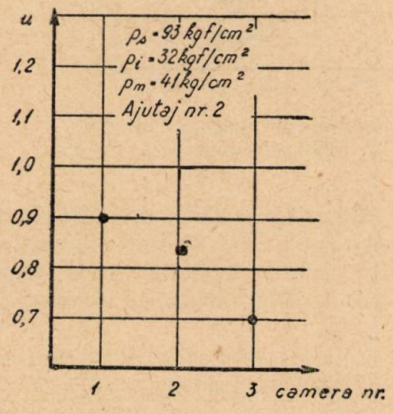



Fig. 13. — Influenţa formei camerei de amestec (secţiunea de scurgere).

controlată de deplasarea experimentală a ajutajului, s-a realizat camera de amestec cilindrică foarte lungă la începutul difuzorului.

*d*) Forma camerei (secțiunea de scurgere) are influență asupra coeficientului de injecție. Dintre formele experimentate, cea care se comportă

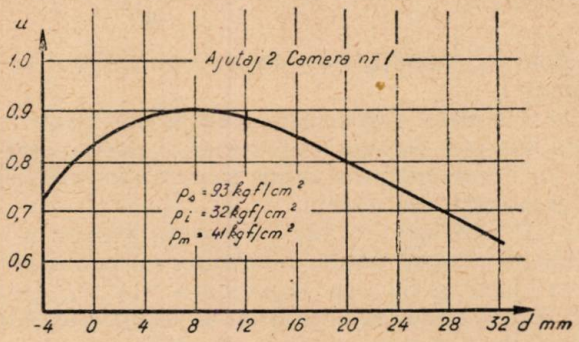



Fig. 14. — Lungimea optimă a camerei de amestec pentru condițiile nominale, camera nr. 1.

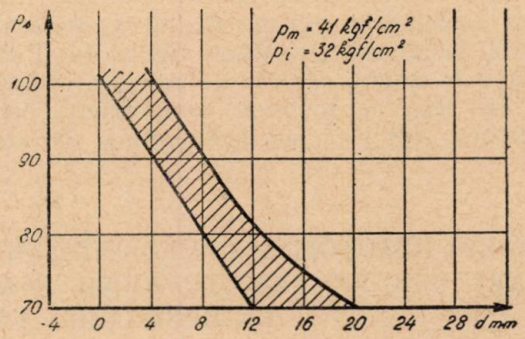



Fig. 15. — Variația lungimii camerei de amestec în funcție de presiunea superioară.

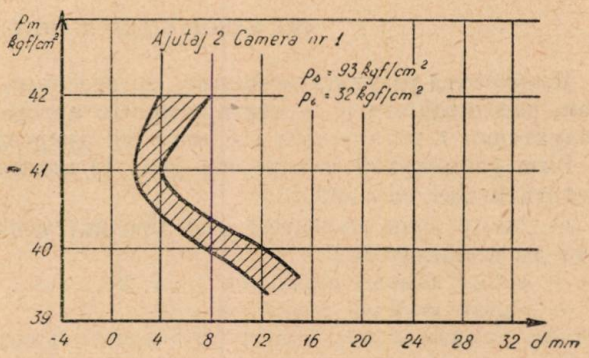



Fig. 16. — Variația lungimii camerei de amestec în funcție de presiunea medie.

cel mai bine (fig. 13) este camera nr. 1, la care secțiunea de scurgere corespunde unor condiții aerodinamice ameliorate, satisfăcîndu-se și condiția respectării legii impulsului. Cel mai prost se comportă camera nr. 3, care deși cu secțiune mare, prelungește exagerat camera de amestec și dă cu siguranță naștere la fenomene aerodinamice parazite. Totuși,

asupra camerei nr. 2 se face rezerva că această cameră nu a fost experimentată cu distanța optimă dintre ajutaj și intrarea în difuzor.

În ceea ce privește forma ajutajului, materialul disponibil pînă în prezent, nu permite tragerea unei concluzii.

★

Asupra rezultatelor experimentărilor, se pot trage următoarele concluzii:

1) Lucrarea reprezintă o etapă de lucru în problema studiată.

2) Se pot calcula cu precizie tehnică compresoare cu jet de gaze, care, în domeniul presiunilor și debitelor studiate, să asigure performanțele rezultate din calcul.

3) Pentru camera nr. 1 se poate preciza o lungime optimă a camerei de amestec, ce se poate determina cu ajutorul curbei din figura 14.

4) Dacă presiunea superioară variază pentru camera de amestec nr. 1, se pot ameliora condițiile de lucru, realizîndu-se o variație a lungimii camerei de amestec, conform figurii 15.

5) Dacă presiunea medie variază pentru camera de amestec nr. 1, se pot ameliora condițiile de lucru, realizîndu-se o variație a lungimii camerei de amestec, conform figurii 16. Pentru orice altă condiție decît condiția de calcul, camera de amestec trebuie făcută mai lungă.

În ceea ce privește comportarea celorlalte camere de amestec, rezultatele sînt încă neconcludente și ele urmează a fi continuate.

## ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ГАЗОСТРУЙНЫЙ КОМПРЕССОР, РАБОТАЮЩИЙ НА ПРИРОДНЫХ ГАЗАХ

### (КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Излагаются результаты опытов, проведенных с газоструйным компрессором, рассчитанным и спроектированным авторами для реальных условий эксплуатации в местностях, где имеются природные газы.

Вышеупомянутый компрессор (рис. 1) позволяет изменять следующие конструктивные параметры:

— длину зоны смешения — в предположении, что смешение происходит до распылителя;

— форму камеры смешения (рис. 2);

— форму насадки сопла (рис. 3);

опытная установка (рис. 4) позволяет изменять среднее и высокое давление.

Согласно известным зависимостям (1), (2) и (3) компрессор был рассчитан для работы с коэффициентом инжектирования $u = 0{,}75$, причем были получены экспериментальные результаты, весьма приближающиеся к расчетным.

Для истолкования результатов, полученных из опыта, все данные были сведены к низкому давлению в 32 кг/см$^2$ при помощи поправочного члена; измерения были выполнены с технической точностью.

Результаты показывают превосходство камеры № 1 и позволяют в отношении этой камеры ограничение зоны оптимальной длины камеры (рис. 14).

Полученные результаты, а также поведение газоструйного компрессора рассматриваются в условиях, отличных от расчетных условий.

Выводятся заключения относительно поведения компрессора и относительно будущих испытаний.

## ОБЪЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1.— Чертеж испытуемого газоструйного компрессора.
Рис. 2.— Исследуемые камеры смешения.
Рис. 3.— Форма исследуемого сопла.
Рис. 4.— Опытная установка для испытания газоструйного компрессора.
Рис. 5.— Влияние высшего давления на поправочный член.
Рис. 6.— Значение поправочного члена $A$, используемого для поправки коэффициента инжектирования.
Рис. 7.— Влияние изменения высшего и среднего давлений на поведение испытуемого компрессора.
Рис. 8.— Влияние испытуемых параметров.
Рис. 9.— Изменение коэффициента инжектирования при различных длинах камеры в сверхзвуковом и в подзвуковом режимах.
Рис. 10 — Влияние длины смесительной камеры на коэффициент инжектирования в случае камеры № 1.
Рис. 11.— Влияние длины смесительной камеры на работу газоструйного компрессора (камера № 2).
Рис. 12.— Влияние длины смесительной камеры на работу газоструйного компрессора (камера № 3).
Рис. 13.— Влияние формы смесительной камеры (сечение на выбросе).
Рис. 14.— Оптимальная длина смесительной камеры в номинальных условиях (камера № 1).
Рис. 15.— Изменение длины смесительной камеры в зависимости от высшего давления.
Рис. 16.— Изменение длины смесительной камеры в зависимости от среднего давления.

# INFLUENCE DE CERTAINS PARAMÈTRES FONCTIONNELS ET CONSTRUCTIFS SUR LE COMPRESSEUR À JET DE GAZ NATURELS

## (RÉSUMÉ)

On présente les résultats expérimentaux obtenus avec un compresseur à jet de gaz naturels, dont le calcul et le projet ont été effectués par les auteurs en tenant compte des conditions réelles d'exploitation, dans les champs de gaz naturels.

Le compresseur réalisé (fig. 1) permet la variation de quelques paramètres constructifs :

—la longueur de la chambre de mélange (dénommée ainsi dans l'hypothèse que le mélange a lieu jusqu'au diffuseur);

—la forme de la chambre de mélange (fig. 2);

—la forme de l'ajutage (fig. 3);

quant à l'installation expérimentale (fig. 4), elle permet de varier la pression moyenne et la pression superieure.

BUDAPESTI MŰSZAKI EGYETEM KÖZPONTI KÖNYVTÁRA

Conformément aux relations connues (1), (2) et (3), le compresseur a été calculé de manière à fonctionner avec un coefficient d'injection $u = 0{,}75$, les résultats expérimentaux étant très voisins de ceux obtenus par calcul.

Dans le but d'interpréter les résultats expérimentaux, on a réduit toutes les donnees à la pression inférieure de 32 kgf/cm$^2$, au moyen d'un facteur de correction. On souligne que les mesures ont été effectuées avec une précision technique.

Les résultats montrent la superiorité de la chambre n° 1 et permettent de limiter un domaine de longueur optimum de cette chambre (fig. 14).

On discute les résultats obtenus et la manière dont le compresseur à jet de gaz naturels se comporte dans des conditions différentes de celles de calcul.

On en tire des conclusions en ce qui concerne le fonctionnement du compresseur et les expériences à faire à l'avenir.

## EXPLICATION DES FIGURES

Fig. 1. — Schéma du compresseur à jet de gaz naturels soumis à l'expérience.
Fig. 2. — Les chambres de mélange étudiées.
Fig. 3. — La forme de l'ajutage étudié.
Fig. 4. — Installation expérimentale pour l'essai du compresseur à jet.
Fig. 5. — Influence de la pression supérieure sur le terme de correction.
Fig. 6. — La valeur du terme de correction $A$, utilisé pour corriger le coefficient d'injection.
Fig. 7. — Influence des variations de la pression supérieure et de la pression moyenne sur les performances du compresseur expérimenté.
Fig. 8. — Influence des paramètres expérimentés.
Fig. 9. — Variations du coefficient d'injection pour diférentes longueurs de chambre en régimes supersonique et subsonique.
Fig. 10 — Influence de la longueur de la chambre de mélange sur le coefficient d'injection, dans le cas de la chambre n° 1.
Fig. 11. — Influence de la longueur de la chambre de mélange sur le fonctionnement du compresseur à jet de gaz nateurels, chambre n° 2.
Fig. 12. — Influence de la longueur de la chambre de mélange sur le fonctionnement du compresseur à jet de gaz naturels, chambre n° 3.
Fig. 13. — Influence de la forme de la chambre de mélange (section d'écoulement).
Fig. 14. — Longueur optimum de la chambre de mélange pour les conditions nominales, chambre n° 1.
Fig. 15. — Variation de la longueur de la chambre de mélange, en fonction de la pression supérieure.
Fig. 16. — Variation de la longueur de la chambre de mélange, en fonction de la pression moyenne.

## BIBLIOGRAFIE

1. I. Saphier, V. Pimser şi C. A. Vasilescu, *Posibilitatea obţinerii de energie la exploatările de gaze naturale.* Studii şi cercetări de energetică, t. II, nr. 1—4, ianuarie-decembrie 1952, p. 89.
2. N. A. Lojchin, *Transformatori de căldură.* Ed. tehnică, Bucureşti, 1952.
3. I. Saphier, V. Pimser şi C. A. Vasilescu, *Compresorul cu jet de aburi şi câteva aplicaţii ale lui în vederea rezolvării unor probleme practice de termoenergetică.* Studii şi cercetări de energetică, t. I, nr. 1—2, ianuarie-iunie 1951, p. 99.
4. G. Flugel, *Bau und Berechnung von Strahlapparaten.* ZVDI, Forschungsheft, 1939, nr. 395.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 3, 1956

*TERMOENERGETICĂ ŞI TERMOTEHNICĂ*

# CONTRIBUŢIE LA DEZVOLTAREA TEORIEI POLITICII DE EXPLOATARE A GAZELOR NATURALE FOLOSIND COMPRESORUL CU JET DE GAZE NATURALE

DE

A. C. VASILESCU, V. PIMSNER şi P. SVORONOS

Cîmpurile de gaze naturale sînt alcătuite dintr-o succesiune de roci poroase saturate de gaze, dispuse în adîncime. Adîncimea la care se găseşte roca magazin, defineşte presiunea gazului orizontului respectiv. Rezultă deci că în mod natural, fiecare cîmp gazeifer constă dintr-un număr mai mic sau mai mare de orizonturi de presiune înaltă sau de presiune joasă.

Utilizarea la consumator a gazelor naturale necesită transportul lor la distanţă. În funcţie de distanţa la care se găseşte consumatorul, de importanţa debitului consumat şi de sistemul de conducte, se stabileşte o anumită presiune a gazelor naturale la pornire, care se asigură prin alimentarea conductei dintr-un orizont de gaze naturale de presiune superioară celei de pornire la conductă.

Pe măsură ce se extrag gaze din zăcămînt, presiunea orizontului scade, astfel, că după un număr de ani, în funcţie de condiţiile de exploatare şi de zăcămînt, se atinge presiunea conductei de transport.

În acest caz, continuarea exploatării gazelor naturale nu va fi posibilă decît prin :

— micşorarea presiunii de pornire a gazelor prin trecerea sondelor din orizontul respectiv la alt sistem de transport cu presiune de pornire mai mică, ceea ce duce (în lipsa altor orizonturi productive) la micşorarea debitului transportat la distanţă ;

— comprimarea gazelor la pornire sau pe traseu, cu ajutorul unei staţii de compresoare mecanice, ceea ce reprezintă o soluţie legată de investiţii şi cheltuieli de exploatare mari ;

— comprimarea gazelor cu ajutorul compresorului cu jet de gaze — dispozitiv foarte simplu din punct de vedere mecanic [1], [2].

Utilizarea uneia din cele trei metode de prelungire a extracţiei gazelor naturale dintr-un orizont, atunci cînd zăcămîntul a fost adus pînă la presiunea conductei de transport, trebuie avută în vedere de la începutul ex-

ploatării sale, deoarece determină natura investițiilor și sistemul de sonde și de conducte, adică politica de exploatare.

Exploatarea gazelor naturale prin trecerea succesivă a sondelor unui zăcămînt de la o conductă de transport la alta se practică în R.P.R. [3].

Comprimarea gazelor cu ajutorul unei stații de compresoare la pornire nu este încă practicată în cîmpurile noastre de gaze naturale, dar există suficientă literatură și experiență în această direcție [4].

Comprimarea gazelor cu ajutorul compresoarelor cu jet de gaze naturale, metoda care s-a introdus de curînd în exploatările noastre de gaze naturale [5], ridică o serie de probleme noi care duc la modificarea politicii de foraj, exploatare și transport a gazelor. După cunoștințele autorilor, aceste probleme nu sînt dezbătute în literatura de specialitate.

Întrucît, așa cum s-a văzut, în fiecare cîmp se află simultan orizonturi cu presiuni diferite, există posibilitatea de a se utiliza pentru fiecare sistem de transport, gazele din orizonturile cu presiune mai mare, pentru antrenarea gazelor din orizonturile a căror presiune este apropiată de a conductelor de transport, în scop de a :

— epuiza cît mai complet orizonturile de presiune joasă, care alimentează centre de consum apropiate, folosind parțial și rațional energia unor zăcăminte de gaz de presiune mai ridicată ;

— prelungi durata de exploatare, fără montare de stații de compresor mecanic de pornire, a orizonturilor de presiune apropiată de a conductelor de transport ;

— îmbunătăți condițiile de transport al gazelor fără stație de compresoare mecanice pe traseu.

Studiul de față își propune să cerceteze cum se poate folosi principial compresorul cu jet de gaze, în scopul realizării obiectivelor menționate mai sus.

Se cercetează cum variază și cum se calculează coeficientul de injecție [6] în funcție de procesul de epuizare a zăcămîntului. Se concretizează studiul prin cercetarea unui caz optim și general de exploatare a zăcămintelor de gaze naturale, indicîndu-se dependența ce se stabilește între parametrii orizonturilor de gaze naturale legate prin compresoare cu jet de gaze.

## 1. PERFORMANȚELE LA UTILIZAREA ÎN EXPLOATARE A COMPRESORULUI CU JET DE GAZE NATURALE

**1.1.** Se analizează care sînt posibilitățile de utilizare a compresorului cu jet de gaze. Studiul se efectuează în cadrul unei serii de ipoteze simplificatoare. Astfel se consideră următoarele ipoteze :

— Se poate menține pentru un interval de timp, o presiune relativ constantă într-un sistem de conducte colectoare, sau într-un orizont de gaze ;

— Presiunea conductei, în care refulează compresorul cu jet de gaze naturale, este constantă ;

— Debitul de gaze produs de sondă variază direct proporțional cu presiunea de lucru măsurată la capul de erupție al sondei. Se poate scrie

$$G = c \cdot p, \tag{1}$$

unde

$G$ — debitul sondei, $\frac{Nm^3}{zi}$,

$p$ — presiunea de lucru a sondei, măsurată la capul de erupție, $\frac{kgf}{cm^2}$,

$c$ — coeficient constant, $\frac{Nm^3}{zi} \cdot \frac{cm^2}{kgf}$;

ipoteza de mai sus, corespunde exploatării unei sonde cu viteză de filtrare constantă;

— Sondele debitează în regim gazos, adică stratul de ape sărate limitează un volum constant al gazului în timpul exploatării. În acest caz, unei variații a rezervei de gaz din zăcămînt îi corespunde o variație de presiune proporțională.

Această ipoteză permite să se scrie legea diferențială

$$dN = \Omega\, dp$$

sau

$$N = \Omega\,(P - p)$$

și

$$p = P - \frac{N}{\Omega}, \qquad (2)$$

unde

$p$ este presiunea curentă a orizontului la diferite momente ale vieții sale,

$P$ — presiunea inițială a orizontului,

$N$ — producția de gaz a orizontului (cantitatea de gaze naturale extrase),

$\Omega$ — volumul ocupat de gaz în zăcămînt.

— Presiunea din zăcămînt este egală cu presiunea de lucru a sondei măsurată la capul de erupție; se neglijează astfel pierderile de presiune care au loc în procesul de scurgere a gazului din roca magazin și prin sondă.

**1.2.** Compresorul cu jet de gaze naturale folosește energia cinetică a gazelor de presiune superioară, $p_s$, care se destind pînă la o valoare învecinată cu presiunea gazelor de presiune inferioară, $p_i$, pentru a comprima amestecul acestor două gaze pînă la valoarea unei presiuni medii, $p_m$.

Compresorul cu jet de gaze naturale este caracterizat de mărimea coeficientului de injecție

$$u = \frac{G_i}{G_s}$$

($G_i$ — debitul gazelor de presiune inferioară; $G_s$ — debitul gazelor de presiune superioară), care definește cîte kilograme de gaz, de presiune inferioară, sînt comprimate cu un kilogram de gaz de presiune superioară. Coeficientul de injecție se calculează corect prin intermediul unei diagrame $I - S$, curelația

$$u = \frac{k}{\psi}\sqrt{\frac{h_{1t}}{h_2}} - 1, \qquad (3)$$

unde $\frac{k}{\psi} = 0{,}85$ ( = const. pentru regimul de calcul), iar căderile entalpice corespund mărimilor citite în diagrama din figura 1.

Pentru calcule în domeniul presiunilor mici (sau pentru valori apropiate ale presiunilor şi rapoarte de destindere — respectiv de compri-

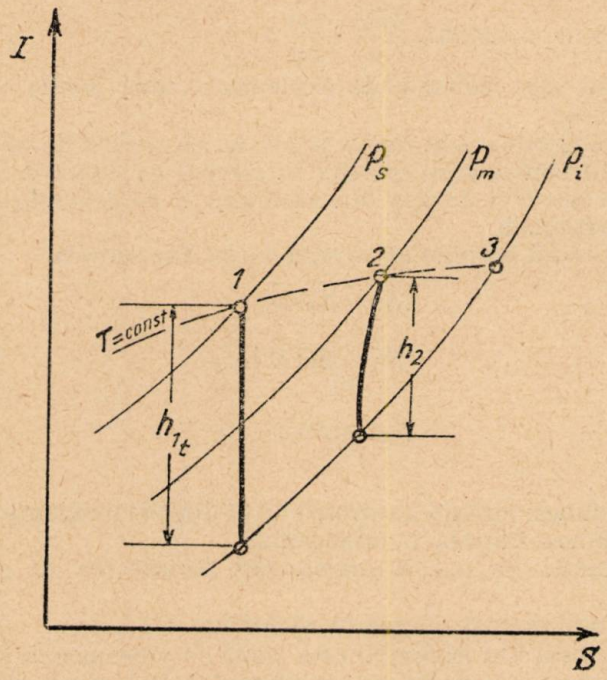



Fig. 1. — Procesul termodinamic al compresorului cu jet de gaze naturale, în diagrama $I - S$ a gazului real.

mare — mici), se poate folosi valoarea analitică a coeficientului de injecţie, dedusă în ipoteza gazelor ideale

$$u = 0{,}894 \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{p_i}{p_s}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}}}{1 - \left(\frac{p_i}{p_m}\right)^{\frac{\varkappa-1}{\varkappa}}}} - 1. \qquad (4)$$

Apare evidentă influenţa parametrilor funcţionali asupra performanţelor compresorului cu jet de gaze. Practica indică [5] de asemenea marea importanţă a parametrilor constructivi ai aparatului.

Pentru a caracteriza parametrul de utilizare a compresorului cu jet de gaze naturale în exploatare, se propune introducerea noţiunii $G_m$ — *producţia compresorului*, adică debitul de gaze naturale livrat de compresorul cu jet de gaze la conducta de presiune medie

$$G_m = G_i + G_s.$$

**1.3.** Se pot stabili patru cazuri tipice de utilizare a compresoarelor cu jet de gaze naturale, după modul cum evoluează în timp, presiunile și rezervele de gaze ale surselor de gaze naturale între care se montează compresorul cu jet.

**1.3.1.** Se consideră (f g. 2) compresorul cu jet de gaze, montat între două rezerve importante de gaze naturale (care pot fi două conducte importante legînd sonde provenind de la două orizonturi de presiuni diferite).

Se consideră că producția compresorului cu jet de gaze, nu poate influența practic variația de presiune în cele două rezerve mari de gaze naturale : evoluția în timp a parametrilor acestor rezerve [illegible] de condițiile de exploatare ale fie[illegible] în parte.

Apar două posibi[illegible].

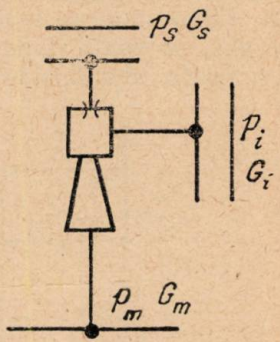



Fig. 2. — Compresorul cu jet de gaze, montat între două rezerve importante de gaze naturale.

**1.3.1.1.** Se consideră că atît presiunea inferioară, cît și presiunea superioară nu variază în timp (pentru un interval de timp suficient de scurt). În acest caz (fig. 3) coeficientul de injecție este constant.

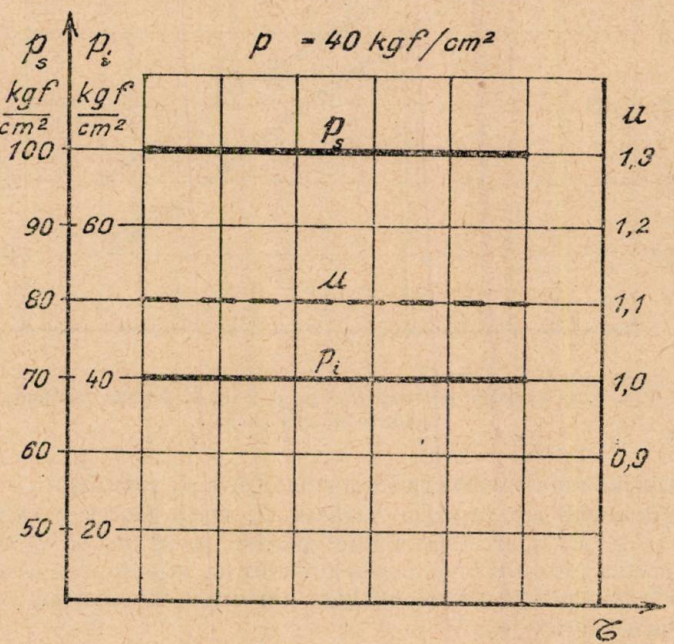



Fig. 3. — Dependența parametrilor $p_s$, $p_i$ și $u$, în funcție de timp, pentru ipoteza 1.3.1.1

Compresorul cu jet :
— funcționează tot timpul la regim optim,
— nu necesită nici o modificare constructivă în timpul exploatării sale ;
— producția sa este constantă.

**1.3.1.2.** Se consideră că presiunea între cele două rezerve de gaze naturale se modifică în timp și independent, după legi dictate de consumatorii exteriori, adică în funcție de procesul de epuizare a rezervelor (fig. 4). Cunoscîndu-se legile de variație a presiunii pentru cele două rezerve de gaz, se poate determina în fiecare moment valoarea acestor presiuni și se poate calcula cu formulele (3) sau (4) valoarea coeficienților de injecție.

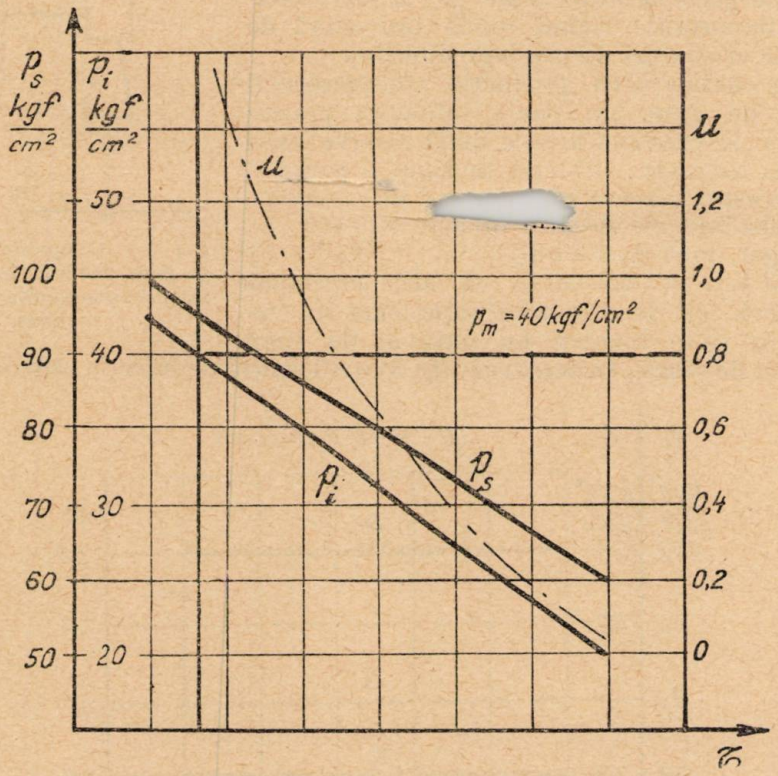



Fig. 4. — Variația parametrilor $p_s$, $p_i$ și $u$, în funcție de timp, $\tau$, pentru ipoteza 1.3.1.2.

Din studiul rezultatelor indicate în figura 4, rezultă :

— coeficientul de injecție variază în timp (între o valoare infinită pentru $p_m = p_i$ și valori foarte mici pentru $p_i \ll p_m$ și $p_s$ mic) ;

— variația presiunilor și coeficientului de injecție duce la necesitatea unor modificări constructive continui ale unor dimensiuni fundamentale ale compresorului cu jet ;

— modificările se fac, în mod practic, periodic ; în perioada dintre două modificări, timp în care constructiv compresorul nu are dimensiuni optime, se remarcă o oarecare scădere a eficienței aparatului, ca urmare a înrăutățirii condițiilor de scurgere ;

— producția compresorului scade continuu, căci :

$$G_m = G_s (1 + u)$$

sau cu relația (1)

$$G_m = c.p_s\,(1 + u),$$

relație în care $p_s$ și $u$ scad continuu.

**1.3.2.** Se consideră (fig. 5) compresorul cu jet de gaze naturale montat între o rezervă mare de gaz de presiune superioară și o sondă de presiune inferioară. În acest caz variația presiunii superioare este practic independentă de prezența compresorului cu jet, în timp ce variația presiunii inferioare (și deci și debitul sondei) depinde de rezerva de gaze naturale de presiune superioară, prin faptul că gazul sondei este comprimat prin compresorul cu jet, de gazele de presiune superioară.

Și în acest caz se pot prezenta două situații :

**1.3.2.1.** Se consideră că presiunea superioară nu variază în timp (pentru un interval de timp suficient de scurt). În acest caz, pe măsură ce se extrage gaz din orizontul de presiune inferioară, presiunea acestuia și implicit debitul scad.

Presiunea sondei de presiune inferioară scade conform relației (2)

$$p_i = P_i - \frac{N_i}{\Omega_i}$$

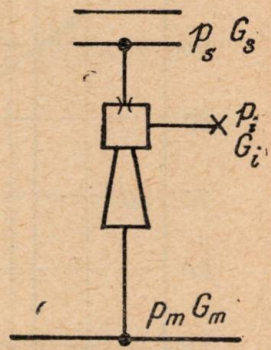



Fig. 5.—Compresorul cu jet de gaze naturale, montat între o rezervă mare de presiune superioară și o sondă de presiune inferioară.

liniar cu producția. Rezultă o micșorare a coeficientului de injecție (fig. 6), pe măsură ce se epuizează sonda de presiune inferioară.

Rezultatele indicate în figura 6 arată variația coeficientului de injecție între o valoare infinită pentru $p_i = p_m$ și valori foarte mici pentru $p_i$ mic. Aceasta va duce la o modificare constructivă a aparatului în timp, și în perioadele dintre două modificări, la micșorarea, întrucîtva, a eficacității aparatului.

Producția aparatului

$$G_m = G_s\,(1 + u)$$

scade dacă se menține același debit de presiune superioară.

În realitate însă, pentru a extrage toată cantitatea de gaz care este debitată de sonda de presiune inferioară trebuie să se debiteze din ce în ce mai mult gaz de presiune superioară

$$G_m = cp_i\left(1 + \frac{1}{u}\right).$$

Funcția de mai sus depinde de două valori : $p_i$ scăzător și $\frac{1}{u}$ crescător. Eventualul punct extrem al acestei funcții se obține din condiția $\frac{dG_m}{dp_i} = 0$. În cazul studiat (fig. 6), în care s-a reprezentat $\frac{G_m}{c}$, se constată că producția crește în mod continuu, în contul debitului de la rezerva de presiune superioară.

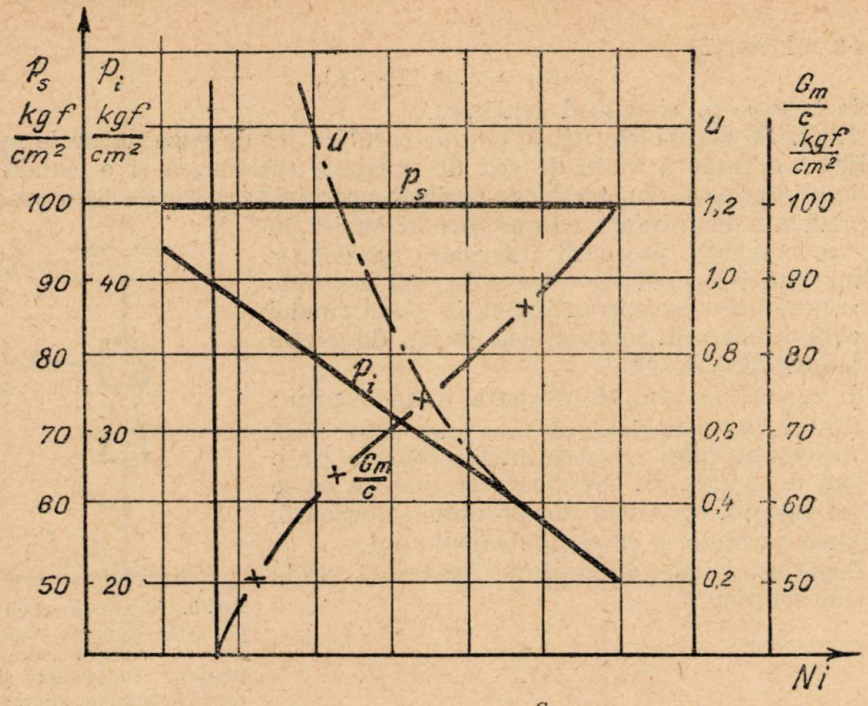



Fig. 6. — Variația parametrilor $p_s$, $p_i$, $u$ și $\frac{G_m}{c}$ în funcție de producția sondei de presiune inferioară $N_i$, pentru ipoteza 1.3.2.1.

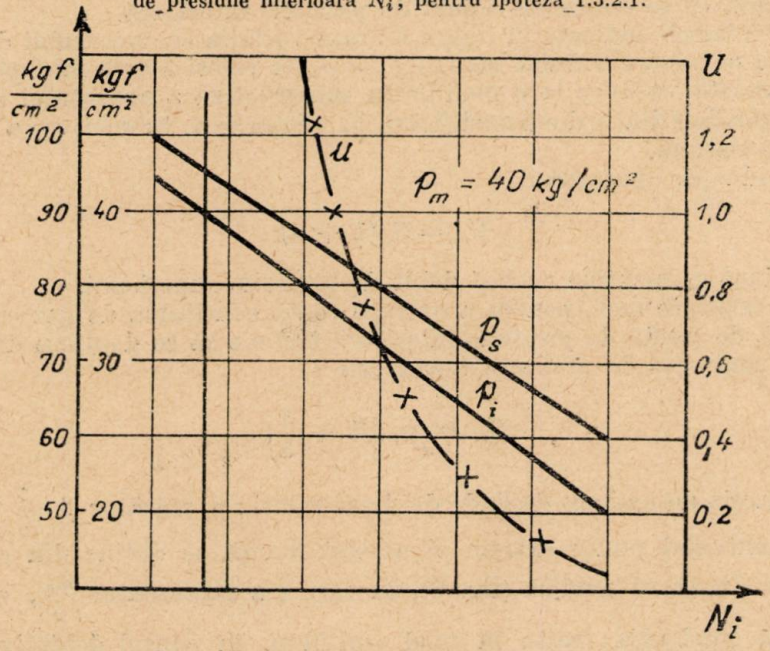



Fig. 7. — Variația parametrilor $p_s$, $p_i$ și $u$, în funcție de producția sondei de presiune inferioară $N_i$, pentru ipoteza 1.3.2.2.

**1.3.2.2.** Se consideră că presiunea superioară variază independent de variația presiunii inferioare, după o lege dictată de consumatorii externi. În acest caz (fig. 7) se mențin concluziile trase la 1.3.2.1., cu observația că $u$ scade mai accentuat.

**1.3.3.** Se consideră (fig. 8) compresorul cu jet de gaze naturale montat între o sondă de presiune superioară și o rezervă mare de presiune inferioară. În acest caz debitul sondei de presiunea superioară, care variază în timp, ca urmare a cantității de gaze extrasă, determină debitul de gaze naturale ce se vor extrage din rezerva de presiune inferioară. Atît parametrii gazelor de presiune inferioară, cît și parametrii gazelor de presiune superioară au o evoluție în timp independentă. Se prezintă și aici două situații :

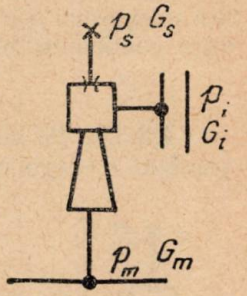



Fig. 8. — Compresorul cu jet de gaze naturale, montat între o sondă de presiune superioară și o rezervă mare de presiune inferioară.

**1.3.3.1.** Se consideră că presiunea inferioară nu variază în timp ; presiunea sondei de presiune superioară, variază în funcție de cantitatea de gaze extrasă, $N_s$

$$p_s = P_s - \frac{N_s}{\Omega_s},$$

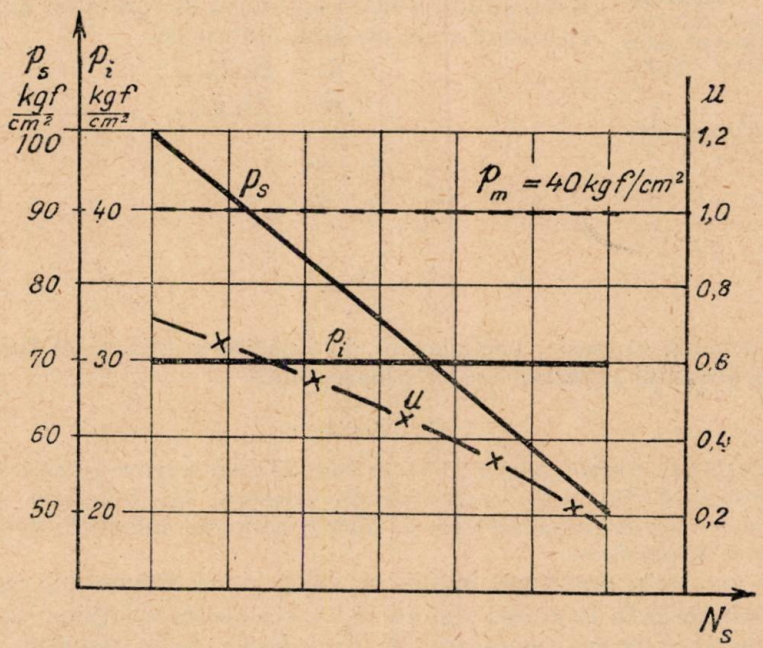



Fig. 9. — Variația parametrilor $p_s$, $p_i$ și $u$, în funcție de producția sondei de presiune superioară $N_s$, pentru ipoteza 1.3.3.1.

adică liniar cu extracția de gaze. Rezultă o scădere a coeficientului de injecție o dată cu extracția de gaze de presiune superioară (fig. 9).

Din studiul acestui caz, rezultă ca atît dimensiunile aparatului, cît şi eficacitatea sa, vor varia în timp.

Producţia de gaze a compresorului cu jet va scădea continuu, datorită micşorării atît a debitului de gaze de presiune superioară, cît şi a scăderii coeficientului de injecţie

$$G_m = cp_s (1 + u).$$

**1.3.3.2.** Se consideră că presiunea inferioară suferă un declin, independent de legătura stabilită cu sonda de presiune superioară prin intermediul compresorului cu jet de gaze. În acest caz se regăseşte ipoteza 1.3.1.2.

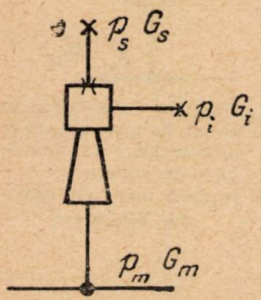



Fig. 10. — Compresorul cu jet de gaze naturale, montat între două sonde din orizonturi diferite.

**1.3.4.** Se consideră (fig. 10) compresorul cu jet de gaze montat între sondele luate două cîte două, din două orizonturi de presiune diferită.

Ca urmare a acestui mod de montaj se stabileşte o dependenţă între variaţia în timp a debitelor şi a presiunilor la cele două orizonturi.

Considerîndu-se ipoteza de la punctul 1.1 asupra volumului constant al zăcămîntului, se va putea scrie dependenţa debitului extras într-un interval infinit mic de timp $d\tau$ de variaţia corespunzătoare a presiunii, pentru orizontul de presiune superioară şi orizontul de presiune inferioară

$$G_s\, d\tau = \Omega_s\, dp_s,$$
$$G_i\, d\tau = \Omega_i\, dp_i,$$

sau prin împărţire

$$\frac{G_i}{G_s} = \frac{\Omega_i}{\Omega_s} \cdot \frac{dp_i}{dp_s},$$

deci

$$\frac{dp_i}{dp_s} = \frac{\Omega_s}{\Omega_i} u. \qquad (5)$$

În această expresie, coeficientul de injecţie $u$ este şi el funcţie de valoarea presiunii superioare şi inferioare, adică

$$u = f(p_s, p_i).$$

Ecuaţia (5) se rezolvă uşor printr-o metodă de integrare grafică (fig. 11), înlocuindu-se curba prin tangentele la aceasta. Se foloseşte sistemul de axe $p_s - p_i$; se împarte axa $p_s$ într-o serie de intervale egale, spre exemplu o atmosferă.

Se cunoaşte presiunea iniţială a celor două orizonturi ($p_{s_0}$ şi $p_{i_0}$) cu care se fixează în diagramă punctul $A_0$. Cu ajutorul relaţiilor (3) sau (4) se calculează valoarea coeficientului de injecţie $u_0$ în punctul $A_0$. Din punctul $A_0$ se duce dreapta de coeficient unghiular $\frac{\Omega_s}{\Omega_i} u_0$, care reprezintă valoarea derivatei $\frac{dp_i}{dp_s}$ pentru punctul $A_0$. La finele intervalului ales $A_1$, se citeşte valoarea presiunilor $p_{s_1}$ şi $p_{i_1}$. Aceste presiuni

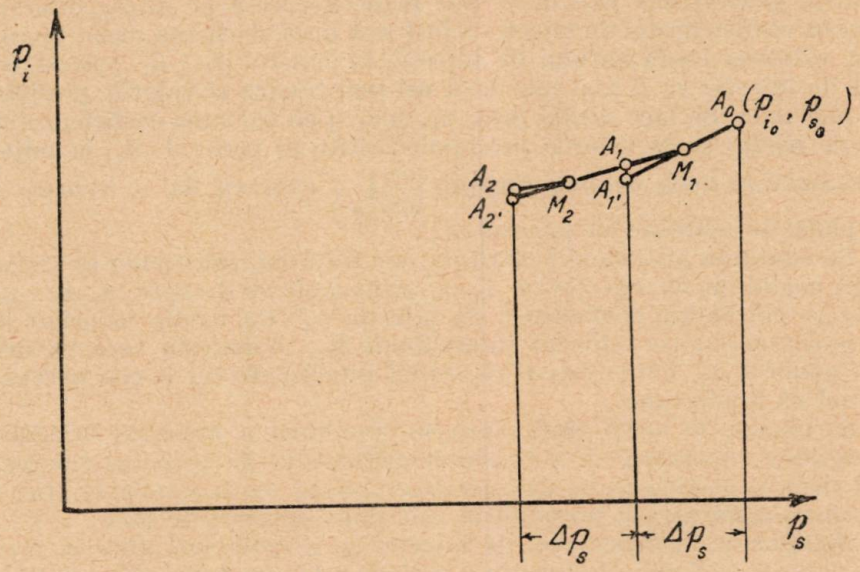



Fig. 11. — Integrarea grafică a ecuației $\frac{dp_i}{dp_s} = \frac{\Omega_s}{\Omega_i} u$.

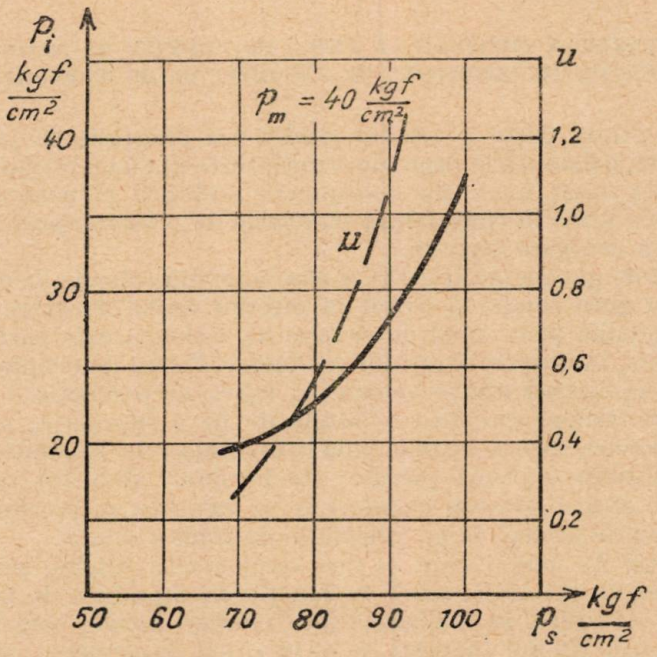



Fig. 12. — Variația parametrilor $p_i$, $p_s$ și $u$, pentru ipoteza 1.3.4.

vor fi în general mai mici decît cele reale, deoarece pe întreg intervalul, valoarea coeficientului de injecţie a fost mai mare decît cea reală. Se calculează valoarea coeficientului de injecţie în punctul $A_{1'}$, $u_{1'}$ ; acest coeficient de injecţie va fi mai mic decît cel real fiindcă şi valorile presiunilor sînt mai mi i. Se face media între $u_0$, şi $u_{1'}$ ; cu valoarea coeficientului de injecţie mediu şi cu valorile presiunilor citite în punctul $M_1$, la mijlocul intervalului se duce o nouă dreaptă $\left(\frac{dp_i}{dp_s}\right)_M$, care va da o valoare mai apropiată de realitate în punctul $A_1$.

Se continuă procedeul pentru un nou interval, calculîndu-se valoarea noului coeficient de injecţie în $A_1$, $u_1$ şi ducîndu-se dreapta $A_1 A_{2'}$, unde în $A_{2'}$ se calculează coeficientul de injecţie $u_2'$. Cu media valorilor $u_1$ şi $u_{2'}$, se desenează din mijlocul intervalului $M_2$, o dreaptă care va determina punctul $A_2$. Este evident că, cu cît intervalele vor fi mai apropiate, calculul va fi mai exact.

Se obţine, în acest mod, variaţia simultană a presiunii orizontului de presiune superioară şi a presiunii orizontului de presiune inferioară, cît şi variaţia coeficientului de injecţie $u$. Acesta scade continuu (fig. 12), ca urmare a micşorării presiunii în cele două cîmpuri de gaze.

Modificarea coeficientului de injecţie (şi a debitelor) duce la necesitatea unor modificări constructive periodice la compresorul cu jet şi de asemenea la mărirea piederilor în aparat între două modificări.

Producţia compresorului cu jet de gaze naturale variază în timp după o lege care depinde de modul de exploatare a celor două orizonturi.

## 2. VARIAŢIA PRESIUNII LA CAPUL DE ERUPŢIE AL SONDEI, ÎN FUNCŢIE DE CONDIŢIILE DE ZĂCĂMÎNT ŞI DE EXPLOATARE

**2.1.** În prima parte a acestui studiu s-a presupus că presiunea de lucru a sondei, măsurată la capul de erupţie, este egală cu presiunea medie a zăcămîntului; acest lucru nu corespunde realităţii şi pentru un calcul corect, trebuie luate în considerare pierderile de presiune prin frecare care apar datorită scurgerii gazului.

O sondă de gaz metan (fig.13) se compune din coloana de exploatare *a* cimentată în gura sondei şi avînd în interior ţeava de extracţie *b* (solidarizate împreună prin capul de erupţie *d*). Coloana este perforată de la talpa sondei, *c*, în dreptul stratului productiv. Capul de erupţie realizează separarea şi etanşarea dintre coloană şi ţeava de extracţie.

Gazul se strînge spre fiecare sondă de pe o suprafaţă, numită zonă de drenaj a sondei, care se întinde pînă la distanţa $r$ de la sondă. În această zonă se realizează o primă pierdere de presiune (datorită rezistenţei pe care o opune stratul trecerii gazului) de la valoarea $p$, presiunea gazului la limita zonei de drenaj, la $p_f$, presiunea de fund a sondei.

În funcţie de modul cum se face exploatarea sondei, prin coloană, sau prin ţeava de extracţie, adică în funcţie de suprafaţa de frecare şi de secţiunea de scurgere, se realizează alte pierderi locale, care fac ca presiunea sondei în timpul lucrului, $p_l$ — la capul de erupţie — să difere de presiunea sa la fund.

**2.2.** Pentru a obține parametrii reali ai funcționării compresorului cu jet se propune să se determine :

— dependența dintre $p$, presiunea de la limita zonei de drenaj a unei sonde și $p_f$, presiunea ei de fund ;

— dependența dintre $p_f$, presiunea de fund a unei sonde și $p_t$, presiunea de lucru măsurată la capul de erupție.

În general, pentru sondele orizonturilor gazeifere care sînt exploatate cu o viteză de filtrare constantă, inferioară vitezei limită la care gazele încep să execute o acțiune mecanică asupra stratului, B. B. Lapuk [7] a stabilit formula simplă

$$G = c \cdot p_f, \qquad (6)$$

în care

$G$ — debitul sondei exprimat în $\frac{\text{Nm}^3}{\text{zi}}$,

$p_f$ — presiunea de fund cînd sonda lucrează,

$c$ — un coeficient de viteză, constant în tot timpul exploatării.

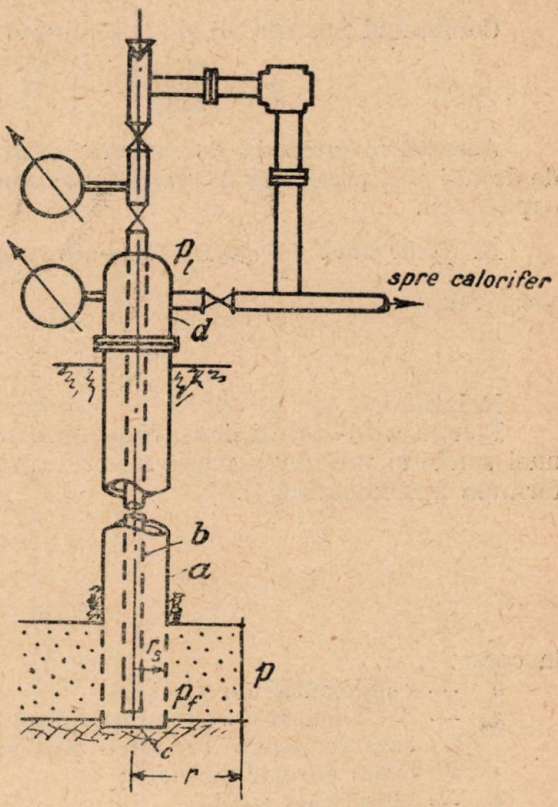



Fig. 13. — Sonda de gaze naturale.

Debitul sondelor poate fi exprimat cu ajutorul formulei lui Leibenzon (citat după [8])

$$G = A\,(p^2 - p_f^2), \qquad (7)$$

în care

$$A = \frac{11{,}75\,\pi kh}{p_0\,\mu \ln \frac{r}{r_s}},$$

unde

$k$ — permeabilitatea stratului,
$h$ — grosimea stratului,
$p_0$ — presiunea atmosferică,
$\mu$ — viscozitatea gazelor,
$r$ — raza zonei de drenaj,
$r_s$ — raza sondei.

În formula (7) se poate considera $A$ = const., întrucît $\ln \frac{r}{r_s}$ variază în limite strînse pentru o sondă dată.

Din relația (7) se obține

$$p_f = \sqrt{p^2 - \frac{G}{A}} \cdot \tag{7'}$$

Combinînd relațiile (6) și (7) se obține :

$$p_f = \frac{c}{2A}\left[\sqrt{1 + \left(\frac{2A}{c}\right)^2 p^2} - 1\right]. \tag{8}$$

Această formulă dă dependența dintre $p$, presiunea la limita zonei de drenaj și $p_f$ presiunea de lucru a unei sonde la fund pentru toată durata exploatării.

În cazul cînd $\frac{2A}{c} \gg 10$ se poate neglija 1 de sub radical și în acest caz

$$p - p_f = \frac{c}{2A} \cdot \tag{9}$$

Relațiile (8) și (9) exprimă dependența dintre presiunile $p$ și $p_f$.

Pentru a se stabili dependența dintre presiunea de fund de lucru a unei sonde și presiunea măsurată la capul de erupție, se va face uz de formula aproximativă *).

$$p_l = \frac{\sqrt{1 - \frac{c^2 z_m^2}{a^2} h}}{e^{\frac{h}{Z_m R T_m}}} p_f, \tag{10}$$

în care

$c$ — coeficientul de viteză,

$z_m$ — coefi ientul de compresibilitate mediu al coloanei de gaz, care caracterizează abaterea gazelor naturale (gaz metan) de la legea gazelor perfecte ;

$h$ — adîncimea sondei ;

$R$ — constanta gazului,

$T_m$ — temperatura medie absolută ;

$a$ — un coeficient care depinde de diametrul țevii, de temperatura absolută din țevile de extracție și de $\lambda = \varphi(R_e)$.

În tabloul nr. 1 sînt date valorile lui $a$ pentru țevi de extracție de diferite diametre, unde $\lambda$ s-a calculat cu formula [4]

*Tabloul nr. 1*

| Țevi de extracție țoli | $a$ |
|---|---|
| 2 | 97 000 |
| 2 1/2 | 170 000 |
| 3 | 292 000 |

$$\lambda = \frac{0{,}0094}{\sqrt[3]{D}} \cdot$$

Din formula (10) rezultă că pentru o sondă dată, valoarea lui $p_l$ scade continuu în timpul exploatării, proporțional cu scăderea lui $p_f$, ceea ce justifică ipoteza simplă de la paragraful 1 al acestei lucrări.

*) Formula (10) este dedusă de S v o r o n o s pe baza măsurătorilor efectuate la sonde și corespunde teoriei din lucrarea [9].

### 3. STUDIUL METODEI EXACTE DE CALCUL PENTRU STABILIREA DEPENDENȚEI PARAMETRILOR A DOUĂ ORIZONTURI DE GAZE NATURALE EXPLOATATE PRIN COMPRESOARE CU JET

**3.1.** Elementele studiate la paragraful 1 al prezentei lucrări, pun problema de principiu a utilizării compresorului cu jet la epuizarea cîmpurilor de gaze naturale; în tratarea diferitelor aspecte s-au folosit și o serie de ipoteze simplificatoare.

În cazul real, trebuie ținut seama de totalitatea factorilor care pot influența comportarea compresorului cu jet de gaze naturale și anume factorii de zăcămînt și de exploatare ai fiecărei sonde în parte în procesul de epuizare al orizonturilor gazeifere.

Se indică metoda de calcul pentru a stabili dependența funcțională dintre procesul de epuizare a două orizonturi, dintre care unul cu gaze de presiune superioară, iar celălalt cu gaze de presiune inferioară, care deservesc o conductă de transport cu o anumită presiune de pornire, cu ajutorul unor compresoare cu jet puse să funcționeze între aceste orizonturi și conductă, în ipoteza că aceste orizonturi trebuie să acopere continuu o anumită cantitate de gaze stabilită prin planul de producție.

În procesul de epuizare a unui orizont, cu ajutorul gazelor unui orizont de presiune superioară, există una sau mai multe posibilități de folosire economică a compresorului.

**3.2.** Se face ipoteza că fiecare sondă de presiune inferioară este situată în imediata vecinătate a unei sonde de presiune superioară.

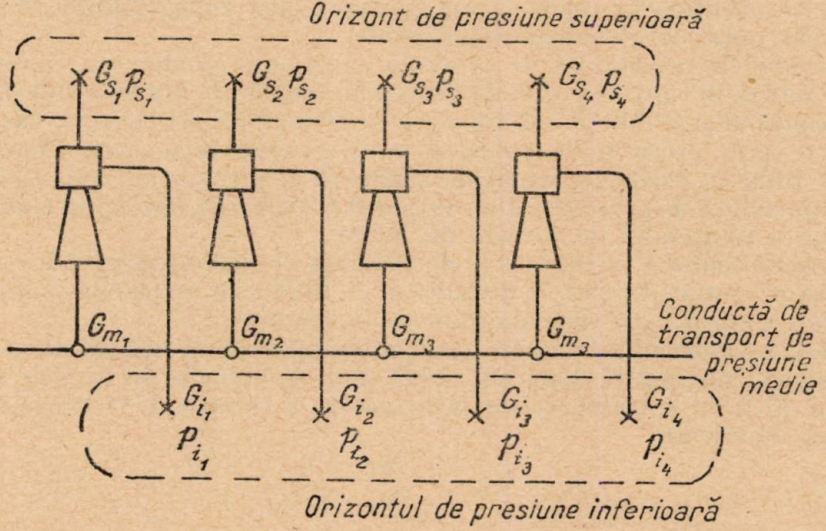



Fig. 14. — Exploatarea a două orizonturi de presiuni diferite cu ajutorul compresorului cu jet de gaze naturale.

În această situație, fiecare sondă din orizontul de presiune superioară va trage gaze cu ajutorul unor compresoare cu jet din sonda corespunzătoare săpată la orizontul de presiune inferioară (fig. 14), cu

alte cuvinte se reia ipoteza 1.3.4., dar se tratează ţinîndu-se seama de situaţia reală.

În ceea ce priveşte momentul punerii în exploatare a orizontului de presiune superioară, se admite că cele două orizonturi produc în paralel pînă cînd presiunea de lucru din orizontul de presiune inferioară scade la valoarea presiunii din conducta de transport.

Din acel moment, fiecare sondă din orizontul de presiune superioară produce gaze active pentru compresorul cu jet, cu care se vor comprima gazele, de la sonda corespunzătoare a orizontului de presiune inferioară. În această ipoteză exploatarea trece prin următoarele două faze :

— Sondele din orizontul de presiune inferioară produc cu viteză de filtrare constantă, egală cu viteza de filtrare limită în toată această perioadă, în timp ce sondele din orizontul de presiune superioară produc cu o viteză de filtrare, care va creşte de la un minimum, pînă la viteza de filtrare limită. Întrucît la începutul acestei faze coeficienţii de injecţie sînt mari, iar sondele orizontului de presiune inferioară nu pot produce cu debite mai mari decît acela corespunzător vitezei limită de filtrare, producţia zilnică planificată nu ar putea fi acoperită decît numai în următoarele două moduri :

— sau prin acoperirea unei părţi a producţiei zilnice cu o cantitate mai mare de gaze de presiune superioară decît aceea care se stabileşte prin coeficientul de injecţie ;

— sau prin menţinerea unui coeficient de injecţie cît mai ridicat, printr-o mărire corespunzătoare a numărului de sonde.

În general nu se va merge la limită cu una din aceste soluţii, ci se va căuta să se menţină un coeficient de injecţie relativ ridicat, fără a se săpa un număr prea mare de perechi de sonde.

— Sondele orizontului de presiune superioară produc cu viteza de filtrare limită, în timp ce viteza de filtrare a sondelor de presiune inferioară scade continuu, în funcţie de valoarea coeficientului de injecţie, care se stabileşte prin procesul de epuizare a celor două orizonturi. Deoarece debitul zilnic al fiecărei perechi de sonde va fi într-o continuă scădere, producţia zilnică de gaze cerută nu va putea fi acoperită decît prin sporirea continuă a numărului de perechi de sonde.

Această metodă ţine seama şi de tendinţa actuală a forajului de a săpa sonde la orizonturi diferite, la distanţe mici, fiind uşor aplicabilă şi oferind în acelaşi timp o mare maleabilitate în exploatare.

**3.3.** Se determină variaţia presiunilor celor două orizonturi, atunci cînd sondele sînt legate două cîte două (fig.14). Calculul se face pe baza ecuaţiei (5), care se poate scrie explicit pentru o variaţie de o atmosferă a presiunii inferioare

$$p_{s_k} - p_{s_{k-i}} = \frac{\Omega_i}{\Omega_s} \cdot \frac{1}{u_{k-i}} \cdot \tag{11}$$

Integrarea se face după metoda prezentată la paragraful 1.3.4., cu observaţia că în ecuaţia (11), presiunea superioară şi presiunea inferioară sînt presiunile de fund ale sondelor, în timp ce coeficientul de injecţie $u$ depinde de presiunea de lucru a sondei, măsurată la capul de erupţie. Prin urmare, pentru fiecare tangentă, trebuie să se stabilească, într-o serie de încercări, presiunea de lucru a sondei, şi coeficientul de injecţie

respectiv. Calculul se conduce ca la 1.3.4., considerîndu-se mai întîi egalitatea presiunii de lucru a sondei cu aceea a zăcămîntului, după care se revine asupra calculului, corectîndu-se valoarea coeficientului de injecție $u$. Prin cîteva încercări două calcule succesive dau rezultate apropiate, care pot fi socotite rezultatele corecte.

Calculul se conduce separat pentru cele două faze :

— În prima fază, debitul sondelor de presiune inferioară poate fi stabilit în funcție de coeficientul de injecție și de numărul de sonde, cu ajutorul formulei

$$Q_i = n \cdot G_i = \frac{Qu}{1+u}, \tag{12}$$

în care $n$ este numărul de perechi de sonde care exploatează cele două orizonturi, iar $G_i$ debitul unei sonde de presiune inferioară care debitează cu viteza de filtrare limită.

Presiunea de lucru a unei sonde din orizontul de presiune inferioară va rezulta dintr-o formulă identică cu (7'), în care însă $n$ este egal cu numărul de perechi de sonde

$$p_{fi} = \sqrt{p_i^2 - \frac{Qu}{nA(1+u)}}. \tag{13}$$

Coeficientul de viteză și presiunea de lucru a sondelor din orizontul de presiune inferioară se calculează cu relația

$$c_i = \frac{G_i}{p_{fi}} = \frac{Qu}{n(1+u)\sqrt{p_i^2 - \frac{Qu}{nA(1+u)}}} \tag{14}$$

și cu ajutorul formulei (10).

Debitul orizontului de presiune superioară se determină cu relația

$$Q_s = n\ G_s = \frac{Q}{1+u},$$

din care se obține

$$G_s = \frac{Q}{n(1+u)},$$

iar pentru presiunea de fund formula

$$p_{fs} = \sqrt{p_s^2 - \frac{G_s}{A}} = \sqrt{p_s^2 - \frac{Q}{nA(1+u)}}. \tag{15}$$

Presiunea de lucru a orizontului de presiune superioară este dată de formula (10).

Se obțin astfel alte valori ale presiunii de lucru la sondele celor două orizonturi și noi valori ale coeficientului de injecție $u$.

Se repetă calculul cu formulele (12) — (15) și printr-un număr relativ redus de încercări, se ajunge la adevărata valoare a lui $u$.

Numărul de perechi de sonde se menține constant pînă în momentul cînd coeficientul de viteză al orizontului de presiune superioară ajunge la limită.

— În faza a doua, sondele orizontului de presiune superioară, produc cu viteza de filtrare limită, în timp ce viteza de filtrare a sondelor de presiune inferioară scade continuu, în funcţie de valoarea coeficientului de injecţie, care se stabileşte prin procesul de epuizare a celor două orizonturi.

Debitul orizontului de presiune superioară este

$$Q_s = n \cdot G_s = n \cdot c \cdot p_{f_s} = \frac{Q}{1+u} \cdot$$

Din această formulă rezultă

$$p_{f_s} = \frac{Q}{n \cdot c\,(1+u)}\ ; \tag{16}$$

$p_{f_i}$ va putea fi calculat cu ajutorul formulei (10). Debitul orizontului de presiune inferioară se determină cu relaţia

$$Q_i = \frac{u}{1+u} Q = n \cdot G_i,$$

de unde rezultă

$$G_i = \frac{u}{n\,(1+u)} Q \tag{17}$$

şi în sfîrşit

$$p_{f_i} = \sqrt{p_i^2 - \frac{G_i}{A}} = \sqrt{p_i^2 - \frac{uQ}{nA\,(1+u)}} \cdot \tag{18}$$

Cu ajutorul formulei (10) se calculează presiunea de lucru a sondelor de presiune inferioară.

Cu ajutorul valorii presiunilor de lucru ale sondelor de presiune inferioară şi superioară se obţine un coeficient de injecţie $u$, care, în general, va fi diferit de cel introdus în calcul. Cu această valoare a lui $u$, introdusă în formula lui $Q'_s$, se obţine o altă valoare pentru $Q'_s$ (debitul orizontului de presiune superioară):

$$Q_s = \frac{Q}{1+u} \cdot$$

Prin cîteva încercări se ajunge la rezultatul dorit. Calculul se conduce după cum s-a arătat din aproape în aproape, făcîndu-se mai multe încercări pe fiecare interval de calcul.

★

Studiul prezentat permite să se urmărească variaţia performanţelor compresorului cu jet în timpul unei perioade de exploatare. Analiza tuturor cazurilor posibile indică modul cum variază producţia de gaz metan şi coeficientul de injecţie. Schemele prezentate în cadrul paragrafului 1 reprezintă cazuri practice, care pot apărea fie în schelele de gaze naturale fie la transportul şi punctele de utilizare a gazelor naturale.

S-a arătat că în timpul exploatării, valoarea coeficientului de injecție depinde nu numai de gradul de epuizare a presiunii din zăcămînt, ci și de valoarea presiunii de lucru care se stabilește la gura fiecărei sonde în condițiile de exploatare ale compresoarelor cu jet de gaze naturale din cîmpurile gazeifere. Metoda de calcul a acestei situații a fost expusă pe larg.

Din studiul făcut s-a constatat că valoarea coeficientului de injecție scade în timp și de asemenea, scade și producția de gaze naturale pentru marea majoritate a cazurilor. Ținînd seama și de modificările de presiune, rezultă necesitatea modificării periodice, la anumite intervale de timp, a

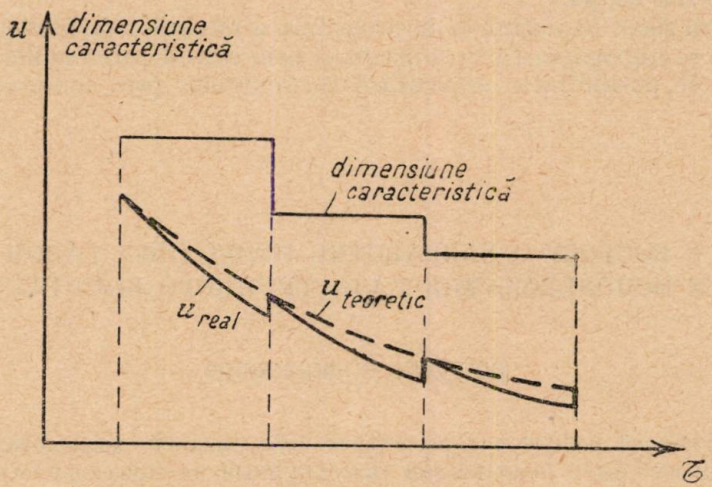



Fig. 15. — Relația dintre variația coeficientului de injecție $u$ și modificările constructive ale compresorului cu jet de gaze.

unor dimensiuni caracteristice ale compresorului. Între două modificări compresorul cu jet nu are dimensiunile optime, ceea ce duce la mărirea pierderilor interne. Acest lucru face ca $u$ să scadă mai brusc între două modificări (fig. 15).

Se atrage atenția că scăderea de presiune a orizonturilor de gaze naturale este mică anual și funcție de exploatare, ceea ce împinge la intervale relativ mari de timp modificările constructive ale compresorului cu jet.

În general, trebuie să se tindă spre o cît mai rațională extindere a utilizării compresoarelor cu jet de gaze. În acest caz, prin mărirea numărului de aparate care solicită două rezerve de gaze, dependența dintre parametrii acestora se mărește.

În cazul cînd variația presiunii gazului de presiune inferioară și superioară corespunde relației (11), se poate stabili că scăderea de presiune a gazului de presiune superioară, pentru o scădere de o atmosferă a presiunii gazului de presiune inferioară, va fi cu atît mai mică, cu cît raportul dintre volumul spațiului umplut de gaze al orizonturilor de presiune inferioară și superioară este mai mic, și cu cît coeficientul de injecție este mai mare. De aceea, în practică, în cazul cînd volumul orizontului de presiune inferioară este mare, un singur orizont de presiune superioară nu va fi în

general suficient pentru o golire sensibilă a orizontului de presiune inferioară, ci va trebui să se acţioneze în paralel cu gaze active provenind din mai multe orizonturi de presiune superioară.

Din cele expuse rezultă comportarea bună a compresorului cu jet de gaze în perioade lungi de exploatare şi necesitatea completării şi continuării studiilor în două direcţii :

— pentru ameliorarea constructivă a compresoarelor cu jet, astfel ca modificările inerente în timp să se poată face cît mai simplu ;

— pentru adîncirea studierii condiţiilor de aplicare în exploatare a compresorului cu jet.

Autorii socot că noţiunea de proiectare a lucrărilor de exploatare [10] trebuie să se îmbogăţească în conţinut şi prin considerarea noilor elemente introduse de posibilitatea exploatării zăcămintelor prin compresor cu jet de gaze.

## К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗОСТРУЙНОГО КОМПРЕССОРА

### (КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

В настоящей работе авторы ставят себе задачей исследовать, как в принципе может быть использован газоструйный компрессор в целях рациональной эксплоатации месторождений природных газов. Исследуются изменения, а также способ расчета коэффициента нагнетания, в зависимости от процесса истощения месторождений при предположении, что давление горизонта равно рабочему давлению у отверстия скважины. Авторы исследуют изменение коэффициента нагнетания $u$ и производительность компрессора $G_m$ (дебит природных газов, поступающих в трубопровод среднего давления).

Исследуются 4 случая, приводящие к 7 вариантам. Из этих вариантов, самый общий — 1.3.1 — позволяет уетановить зависимость (5 , связывающую в любой момент давление горизонта высокого давления с давлением горизонта низкого давления, между которыми работает газоструйный компрессор. Излагается метод интегрирования зависимости.

Авторы указывают также на реальный случай, когда рабочее давление скважины изменяется по сравнению с глубинным давлением горизонта природных газов.

В этом случае рекомендуется метод последовательных проб, комбинированный с методом графического интегрирования.

Авторы устанавливают необходимость изменения во времени характеристических размеров газоструйных компрессоров в результате процесса истощения месторождений ; этим проектирование разработок природных газов пополняется новыми условиями, вводимыми использованнем газоструйного компрессора ; авторы предлагают приступить к тщательному изученню этих вопросов.

## ОБЪЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1. — Термодинамический процесс газоструйного компрессора по диаграмме $I—S$ реального газа.

Рис. 2. — Газоструйный компрессор, смонтированный между двумя важными месторождениями природных газов.

Рис. 3. — Зависимость от времени параметров $p_s$, $p_i$, $u$, при предположении 1.3.1.1.

Рис. 4. — Изменение параметров $p_s$, $p_i$, $u$, в зависимости от времени, при предположении 1.3.1.2.

Рис. 5. — Газоструйный компрессор, работающий на природных газах, смонтированный между крупным резервом высокого давления и скважиной низкого давления.

Рис. 6, — Изменения параметров $p_s$, $p_i'$, $u$, $\frac{G_m}{c}$ в зависимости от продукции скважины низкого давления $N_i$, при предположении 1.3.2.1.

Рис. 7. — Изменения параметров $pt$ $p_i'u$ в зависимости от продукции скважины низкого давления $N_1$ при предположении 1.3.2.2.

Рис. 8. — Газоструйный компрессор, работающий на природных газах, смонтированный между скважиной высокого давления и крупным резервом низкого давления.

Рис. 9. — Изменения параметров $p_s$, $p_i$, $u$, в зависимости от продукции скважины высокого давления при предположении 1.3.3.1.

Рис. 10. — Газоструйный компрессор, смонтированный между двумя скважинами различных горизонтов.

Рис. 11. — Графическое интегрирование уравнения $\frac{dp_i}{dp_s} = \frac{\Omega_s}{\Omega_i} u$.

Рис. 12. — Изменение параметров $p_i'$, $p_s$, $u$, при предположении 1.3.4.

Рис. 13. — Скважина природных газов.

Рис. 14. — Разработка двух горизонтов различных давлений при помощи газоструйного компрессора.

Рис. 15. — Зависимость между изменением коэффициента нагнетения и конструктивными изменениями газоструйного компрессора.

## CONTRIBUTION AU DÉVELOPPEMENT DE LA THÉORIE DE LA POLITIQUE D'EXPLOITATION DES GAZ NATURELS EN UTILISANT LE COMPRESSEUR À JET DE GAZ NATURELS

(RÉSUMÉ)

Dans le présent travail, les auteurs se proposent d'étudier la manière d'utiliser, en principe, le compreseur à jet de gaz et quelles en sont les performances dans l'exploitation rationnelle de champs de gaz naturels. On étudie comment varie et comment on calcule le coefficient d'injection en fonction du processus d'épuisement des gisements dans le cadre de l'hypothèse, admettant qu'une pression de l'horizon est égale à la pression de travail au trou de la sonde. Les auteurs étudient la variation du coefficient d'injection $u$ et la production du compresseur $G_m$ (débit des gaz naturels livrés à la conduite de pression moyenne).

On étudie quatre cas qui conduisent à sept variantes distinctes. Parmi celles-ci, la plus générale 1.3.4 permet d'établir une relation (5) reliant à chaque moment la pression de l'horizon à pression supérieure à la pression de l'horizon à pression inférieure, entre lesquels on fait fonctionner un compresseur à jet de gaz naturels. On présente la méthode d'intégration de cette relation.

Les auteurs indiquent également le calcul d'un cas réel où la pression de travail de la sonde varie par rapport à la pression de fond, de l'horizon des gaz naturels.

On recommande dans ce cas une méthode d'essais successifs, combinée avec une méthode d'intégration graphique.

Les auteurs constatent la nécessité de modifier, avec le temps, les dimensions caractéristiques des compresseurs à jets de gaz, comme suite du processus d'épuisement des gisements. Les exigences des projets d'exploitations des gaz naturels sont complétées de nouvelles conditions, introduites par l'utilisation du compresseur à jet de gaz ; les auteurs proposent l'étude approfondie des ces problèmes.

## EXPLICATION DES FIGURES

Fig. 1. — Procesus thermodynamique du compresseur à jet de gaz naturels dans le diagramme $I - S$ du gaz réel.

Fig. 2. — Compresseur à jet de gaz monté entre deux réserves importantes de gaz naturels.

Fig. 3. — Dépendance des paramètres $p_s$, $p_i$ et $u$ en fonction du temps, pour l'hypothèse 1.3.1.1.

Fig. 4. — Variation des paramètres $p_s$, $p_i$ et $u$ en fonction du temps pour l'hypothèse 1.3.1.2.

Fig. 5. — Compresseur à jet de gaz naturels monté entre une grande réserve de pression supérieure et une sonde de pression inférieure.

Fig. 6. — Variation des paramètres $p_s$, $p_i$, $u$ et $\frac{G_m}{c}$ en fonction de la production de la sonde de pression inférieure $N_i$ pour l'hypothèse 1.3.2.1.

Fig. 7. — Variation des paramètre $p_s$, $p_i$ et $u$ en fonction de la production de la sonde de pression inférieure $N_i$, pour l'hypothèse 1.3.2.2.

Fig. 8. — Compresseur à jet de gaz naturels monté entre une sonde de pression supérieure et une grande réserve de pression inférieure.

Fig. 9. — Variation des paramètres $p_s$, $p_i$ et $u$ en fonction de la production de la sonde de pression supérieure $N_s$, pour l'hypothèse 1.3.3.1.

Fig. 10. — Compresseur à jet de gaz naturels monté entre deux sondes d'horizons diférents.

Fig. 11. — Intégration graphique de l'équation $\frac{dp_i}{dp_s} = \frac{\Omega_s}{\Omega_i} u$.

Fig. 12. — Variation des paramètres $p_i$, $p_s$ et $u$, pour l'hypothèse 1.3.4.

Fig. 13. — Sonde à gaz naturels.

Fig. 14. — Exploitation de deux horizons de pression différentes à l'aide du compresseur à jet de gaz naturels.

Fig. 15. — Relation entre la variation du coefficient d'injection $u$ et les modifications de la construction du compresseur à jet de gaz.

## BIBLIOGRAFIE

1. I. Saphier, V. Pimsner şi A. C. Vasilescu, *Posibilitatea obţinerii de energie la exploatările de gaze naturale.* Studii şi cercetări de energetică, t. II, 1952, p. 89.
2. P. Svoronos, *Exploatarea gazului metan prin folosirea raţională a presiunii de zăcământ.* Petrol şi gaze, 1955, nr. 8, p. 368.
3. — *Durata maximă de exploatare a orizonturilor şi cîmpurilor de gaz metan.* Petrol şi gaze 1952, nr. 12, p. 14.
4. A. S. Smirnov, *Transportul şi înmagazinarea gazelor.* Ed. tehnică, Bucureşti, 1953, p. 350.

5. V. Pimsner și A. C. Vasilescu, *Influența unor parametri funcționali și constructivi asupra compresorului cu jet de gaze naturale.* (acest volum p. 207).
6. I. Saphier, V. Pimsner și A. C. Vasilescu, *Compresorul cu jet de aburi și câteva aplicații ale lui, în vederea rezolvării unor probleme practice de termoenergetică.* Studii și cercetări de energetică, t. I, nr. 1—2, 1951, p. 99.
7. B. B. Lapuk, *Ghidrodinamiceskie osnovî razrabotki gazovîh mestorojdenii.* Gostoptehizdat, Moscova, 1947.
8. * * * *Manualul inginerului petrolist.* Ed. tehnică, București, 1955.
9. * * * *Voprosî dobîci, transporta obrabotki prirodnîh gazov.* Gostoptehizdat, Moscova 1955.
10. N. M. Nikolaevski, *Metodî proektirovania razrabotki grupî gazovogo — mestorojdenia.* Gostoptehizdat, Moscova, 1952.

5 c. 1972

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 3, 1956

*MAŞINI TERMICE*

# INFLUENŢA DOZAJELOR SĂRACE ASUPRA CARACTERISTICII DE PUTERE A MOTOARELOR CU APRINDERE PRIN SCÎNTEIE ŞI COMBUSTIBIL LICHID, TRANSFORMATE SĂ FUNCŢIONEZE CU GAZE NATURALE

DE

A. C. VASILESCU şi V. PIMSNER

Problema utilizării raţionale a combustibililor, ce pot fi folosiţi în motoarele cu ardere internă, face parte din politica generală economică a unui stat socialist. În R.P.R., unde cantităţile de gaze naturale sînt mari, omogene în compoziţie şi de mare concentraţie în gaz metan, folosirea acestui combustibil pentru motoare trebuie luată în consideraţie. În literatura ce tratează această problemă [1], [2], [3] se face distincţia dintre motoarele stabile şi motoarele de autovehicul, între procedeele simple la motoarele cu aprindere prin scînteie şi procedeele complexe, cu doi combustibili la motoarele cu aprindere prin compresie.

Pentru motoarele de autovehicul se recomandă, în afară de alimentarea cu gaze naturale (înmagazinate la presiune joasă, la presiune mare, sau lichefiate la presiune mare) şi posibilitatea de folosire a benzinei, astfel că aceste motoare devin de fapt cu alimentare mixtă.

Se cunoaşte că în general, regimurile de dozaje sărace sînt mai economice din punctul de vedere al consumului de combustibil. La dozajele sărace, adică la excese mari de aer, se dezvoltă mai puţină căldură pe unitatea de cantitate de amestec proaspăt, ceea ce duce la o scădere a lucrului mecanic pe ciclu.

Este util prin urmare să se cerceteze, în privinţa economicităţii, domeniul dozajelor sărace (domeniul în care coeficientul excesului de aer este supraunitar), dar este necesar să se determine pierderea de putere corespunzătoare.

În articolul de faţă se prezintă rezultatele obţinute prin alimentarea cu gaze naturale, în domeniul dozajelor sărace, a unui motor de autobuz cu aprindere prin scînteie cu benzină, de tip mai vechi (anul 1935), menţinînd totodată posibilitatea alimentării cu combustibil lichid.

Se cercetează factorii care influenţează puterea şi se studiază în ce măsură se poate aprecia, printr-un calcul analitic scăderea puterii produsă de sărăcirea dozajului. Se propune să se aprecieze influenţa acestor factori printr-o serie de coeficienţi de corecţie care se deduc teoretic şi experimental.

## 1. MOTORUL STUDIAT ŞI BANCUL DE PROBĂ

**1.1.** În cadrul acestor experimentări s-a folosit un motor cu aprindere prin scînteie în patru timpi cu şase cilindri, cu cameră de ardere cu supape în cap, fabricat RENAULT şi cu următoarele date principale :

— diametrul cilindrului . . . . . $D = 110$ mm
— cursa pistonului . . . . . $s = 140$ mm
— raportul volumetric de compresie . . . . . $\varepsilon = 4{,}5$
— turaţia . . . . . $n = 1\,700 \frac{\text{rot}}{\text{min}}$;

Răcirea cu apă, pistoane de aluminiu, arborele cu patru paliere, carburator vertical, aprindere prin magnetou, ungere sub presiune.

La acest motor s-a adoptat un amestecător de gaze naturale prin transformarea difuzorului carburatorului (fig. 1).

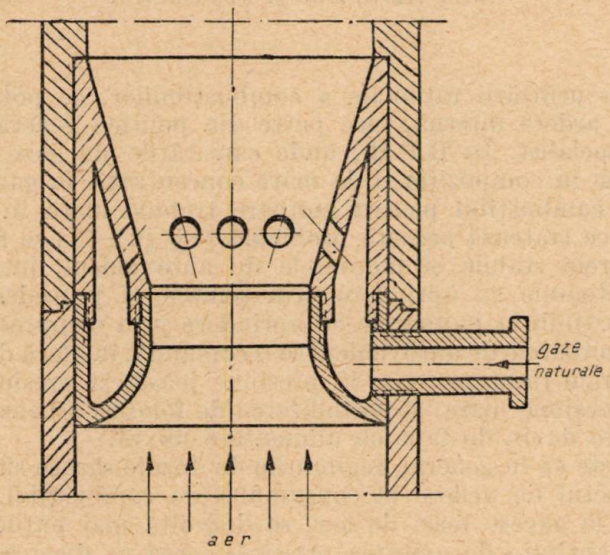



Fig. 1. — Amestecătorul de gaze naturale pentru asigurarea funcţionării în sarcină.

Prin acest dispozitiv se menţine posibilitatea funcţionării cu benzină ; amestecătorul prezentat asigură mersul în sarcină. Pentru mersul în gol s-a prevăzut un racord suplimentar de gaze naturale în regiunea de după obturator.

**1.2.** Motorul a fost instalat pe un banc de probă special conceput pentru a asigura alimentarea cu benzină sau cu gaze naturale.

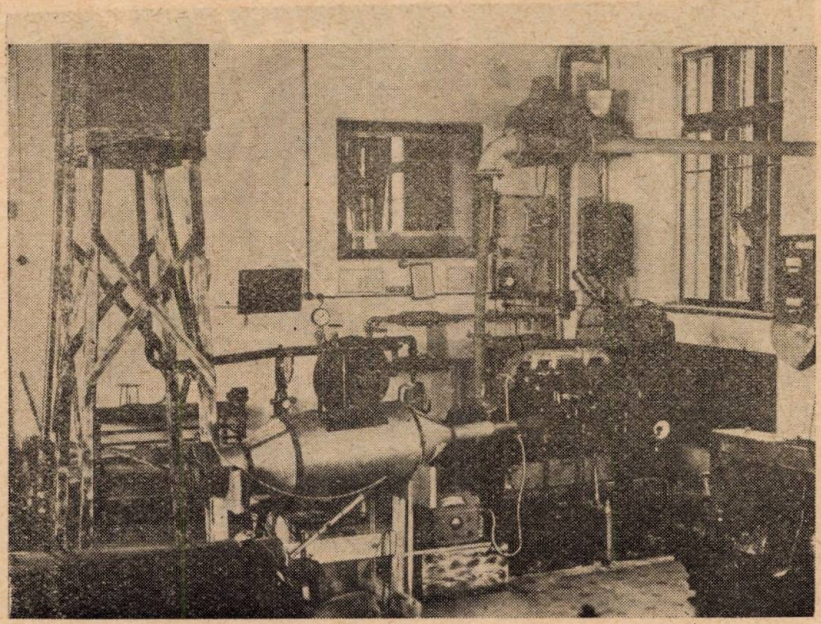


Fig. 2. — Bancul de probă ; vedere generală.

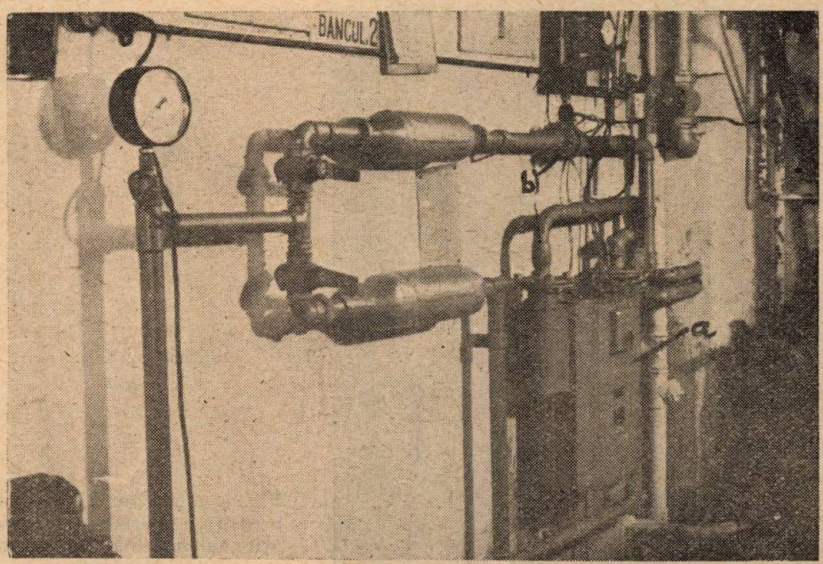



Fig. 3. — Poligonul de măsură a gazelor naturale.
*a*, ramura pentru măsurarea prin contor volumetric ; *b*, ramura pentru măsurarea cu diafragmă.

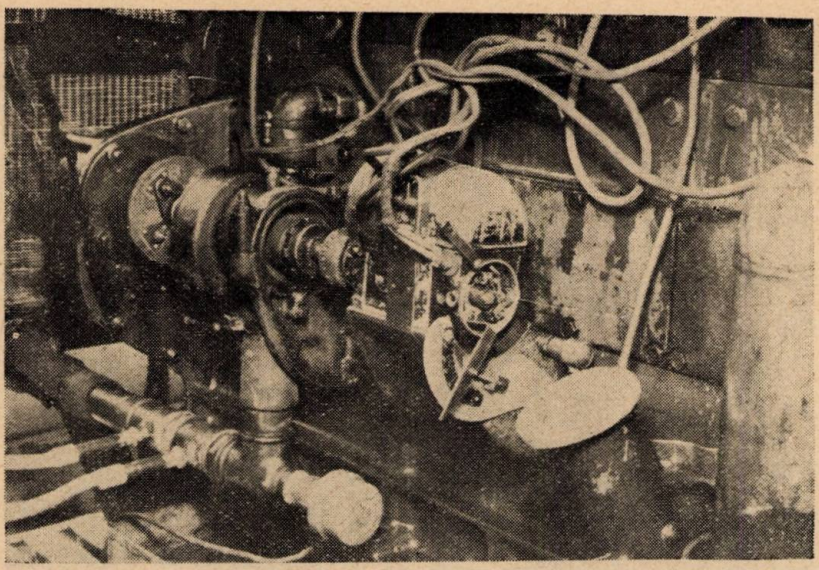


Fig. 4. — Magnetoul motorului experimentat cu avans variabil comandat manual.

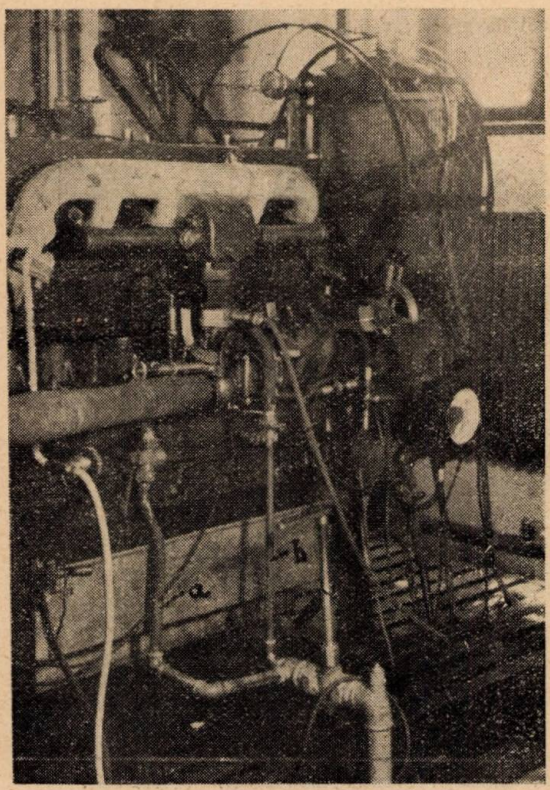



Fig. 5. — Carburatorul modificat pentru a permite funcționarea atît cu benzină, cît și cu gaze naturale.

*a*, conducta de gaze naturale pentru funcționarea în sarcină; *b*, conducta de gaze naturale pentru funcționarea la mers încet.

Bancul de probă (fig. 2) este prevăzut cu aparatură și instalații care asigură următoarele :

— instalarea și fixarea motorului pe o placă de fundație cu racordurile de apă, gaze de evacuare și o răcire artificială a băii de ulei ;

— frînarea motorului cu o frînă hidraulică de precizie ;

— măsurarea debitului de benzină cu o instalație bazată pe măsurător volumetric și cronometru sincron electric ; măsurarea debitului de gaze naturale prin două metode : contor volumetric sau diafragmă de măsură și micromanometru ; măsurarea debitului de aer cu instalație cuprinzînd egalizator de presiune, diafragmă și micromanometru ; măsurarea debitului apei de răcire cu un rotametru ;

— măsurarea temperaturilor apei de răcire în două puncte ; a uleiului ; a gazelor arse ; a sediului și a vîrfului electrodului central al bujiilor ;

— măsurarea avansului la aprindere cu dispozitiv electro-optic cu bec de neon ;

— măsurarea presiunii uleiului ; a presiunii din galeria de aspirație ; a presiunii gazelor naturale înainte de intrarea în difuzorul amestecătorului ;

— determinarea compoziției gazelor arse, fie prin analiză chimică, fie prin analizor de gaze, bazat pe variația rezistențelor electrice ale conductorilor.

În figura 3 se prezintă poligonul de măsură al gazelor naturale prevăzut cu două ramuri : una pentru măsurare prin contor volumetric de gaze *a* și a doua pentru măsurare cu diafragmă *b*.

Magnetoul motorului a fost transformat, pentru a permite varierea manuală a avansului la aprindere (fig. 4) ; pentru buna funcționare a motorului s-a păstrat avansul centrifugal.

La carburator (fig. 5) se racordează două conducte de gaze naturale ; prima, *a*, care aduce gazele naturale la difuzor, pentru a se asigura funcționarea în sarcină și a doua, *b*, care aduce gazele naturale la o flanșă prevăzută cu un racord de gaze și situată după obturator ; prin acest racord se asigură funcționarea la mers încet.

## 2. STUDIUL TEORETIC

**2.1.** Prin trecerea aceluiași motor de la funcționarea cu benzină la funcționarea cu gaze naturale, se produce o modificare a puterii ; obiectul lucrării este să se aprecieze analitic mărimea acestei modificări de putere.

Se consideră că puterea efectivă a motorului se poate pune sub forma simplă

$$P_e = k \cdot \eta_{is} \cdot Q \cdot \eta_v \cdot \varphi \cdot \eta_m,$$

unde :

$\eta_{is}$ — randamentul termodinamic al ciclului ideal ;

$Q$ — cantitatea de căldură dezvoltată pe ciclu ;

$\eta_v$ — randamentu volumetric ;

$\varphi$ — un coeficient care ține seama de forma reală a evoluțiilor ;

$\eta_m$ — randamentul mecanic.

În general, toți factorii de mai sus (în afară de $\eta_{is}$ = const.) se micșorează atunci cînd un motor realizat să funcționeze cu benzină este pus să funcționeze cu gaz metan.

Astfel, cantitatea de căldură introdusă prin amestecul aer-gaz metan este cu circa 11% mai scăzută decît cea dezvoltată de amestecul aer-benzină.

Randamentul volumetric scade prin trecerea la funcţionarea cu gaze naturale, deoarece nu se mai produce micşorarea de temperatură în procesul de vaporizare a combustibilului şi conducta de aspiraţie rămîne în continuare încălzită prin contactul cu galeria de evacuare.

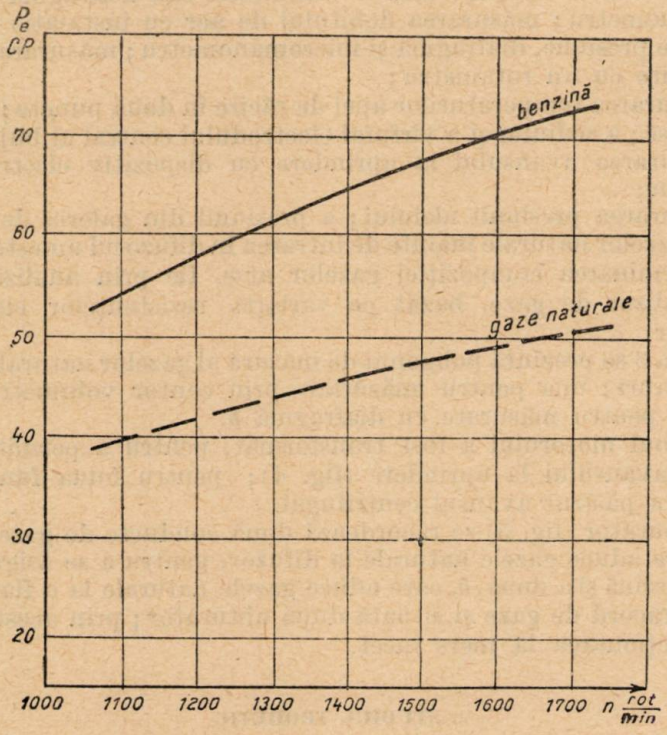



Fig. 6. — Caracteristica externă la funcţionarea motorului Renault cu benzină şi cu gaze naturale.

Termenul $\varphi$, care ţine seama de forma reală a evoluţiilor, se micşorează datorită următoarelor cauze:

— micşorarea vitezei de ardere în cazul funcţionării cu gaze naturale;

— lipsa dilataţiei molare (volumetrice) în cazul arderii gazului metan.

Randamentul mecanic este şi el micşorat, deoarece puterea corespunzătoare pierderilor mecanice şi de frecare $P_f$ rămîne aproape constantă în timp ce puterea indicată, $P_i$, se micşorează, astfel că randamentul mecanic

$$\eta_m = 1 - \frac{P_f}{P_i}$$

scade.

Ansamblul pierderilor de mai sus, duce la micşorarea puterii cu 20—30 %, în funcţie de mărimea cilindreei, de turaţia motorului şi de

raportul volumetric de compresie. În cazul motorului studiat, de turație mică, cu cilindri mari și raport volumetric de compresie mic, scăderea de putere reprezintă circa 30% la plină sarcină (fig. 6).

Trebuie observat că la funcționarea cu gaz metan, motorul s-a încălzit puternic cu toată modificarea avansului (fig. 7), fapt explicabil prin scăderea vitezei frontului de flacără în perioada arderii.

**2.2.** Sărăcirea amestecului duce la o modificare importantă a parametrilor ce determină puterea efectivă a motorului.

**2.2.1.** O dată cu modificarea dozajului, prin sărăcirea amestecului, se micșorează cantitatea de căldură dezvoltată pe ciclu (fig. 8).

Această micșorare poate atinge pentru gazul metan valori importante; se raportează aceste valori la mărimea corespunzătoare arderii corecte (coeficientul excesului de aer $\alpha = 1$) în figura 9.

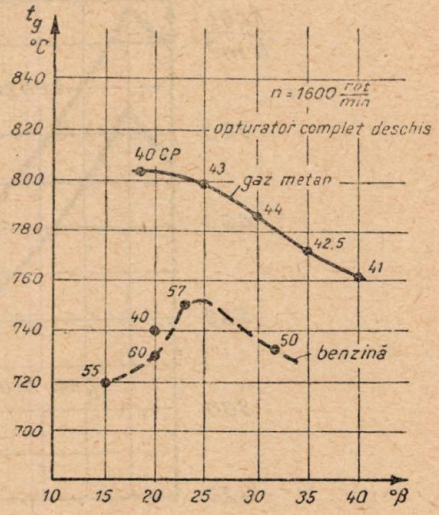



Fig. 7. — Variația temperaturii gazelor arse și a puterii motorului în funcție de avansul la aprindere pentru benzină și gaz metan.

**2.2.2.** În ceea ce privește randamentul volumetric, literatura [4], [5], [6] nu specifică o expresie analitică suficient de clară care să permită să se evalueze influența dozajului asupra valorii acestui randament.

Se prezintă în anexă la această lucrare modul de deducere a unei relații analitice adecvate acestui scop.

Calculele, care au la bază o metodă de deducere cunoscută [7], permit să se obțină relația simplă pentru randamentul volumetric

$$\eta_v = \frac{\lambda}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{1 + kd}{\varkappa\delta + d} \cdot \frac{p_a}{p_e} \left[ \varepsilon (1 + B) - B - \frac{p_r}{p_a} \sigma \right],$$

unde semnificația diferiților termeni se găsește în anexa la lucrare.

Pentru a cerceta cum influențează dozajul valoarea randamentului volumetric se consideră la diverse dozaje aceeași turație și poziție a obturatorului, ceea ce permite să se facă ipoteza că factorii $\lambda$, $\frac{p_a}{p_e}$, $B$, $\frac{p_r}{p_a}$ și $\psi$, rămîn constanți.

Se face calculul cum variază randamentul volumetric pentru diferite excese de aer — în domeniul dozajelor sărace — folosindu-se valorile $\varkappa = 1{,}35$, $\delta = 1{,}15$, $d = \frac{1}{\alpha \min L}$ (unde cu $\alpha$ s-a notat coeficientul excesului

de aer şi cu min $L$ cantitatea teoretică de aer necesară pentru a arde 1 kg de combustibil), $k = 1{,}81$.

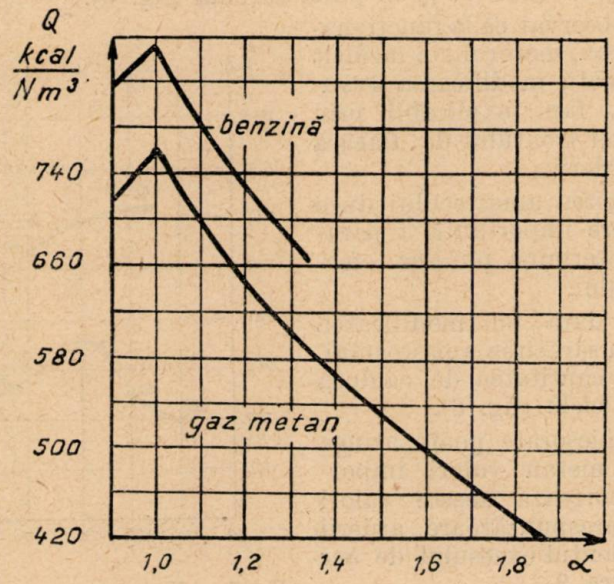



Fig. 8. — Cantitatea de căldură dezvoltată prin arderea unui metru cub de amestec proaspăt (aer-benzină şi aer-gaz metan) la diverse valori ale coeficientului excesului de aer.

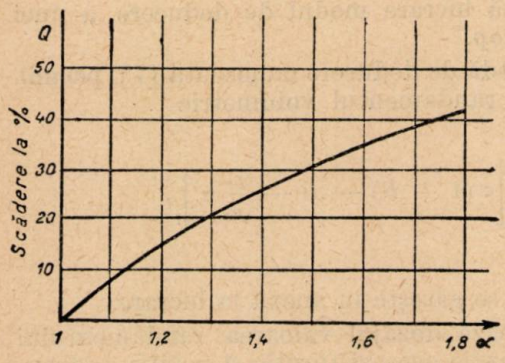



Fig. 9. — Pierderea de efect termic raportată la căldura dezvoltată în cazul arderii teoretice pentru amestecuri de aer - gaze naturale de diferite dozaje, în funcţie de coeficientul excesului de aer.

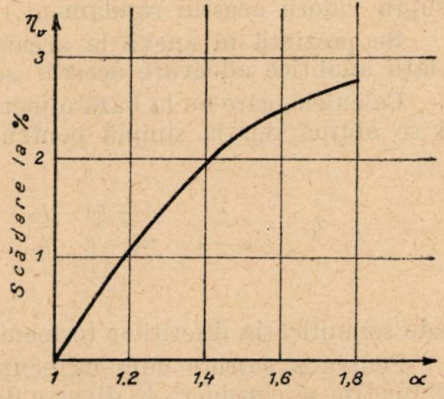



Fig. 10.— Variaţia relativă a randamentului volumetric în funcţie de valoarea coeficientului excesului de aer.

În figura 10, se arată modul cum scade randamentul volumetric cu valoarea coeficientului excesului de aer, calculat cu relaţia

$$\frac{\eta_{v\alpha=1} - \eta_{v\alpha}}{\eta_{v\alpha=1}} \times 100$$

**2.2.3.** Aprecierea factorului $\varphi$ care precizează natura evoluțiilor se face mult mai dificil; în orice caz literatura indică [8] că el este mult influențat de variația coeficientului excesului de aer.

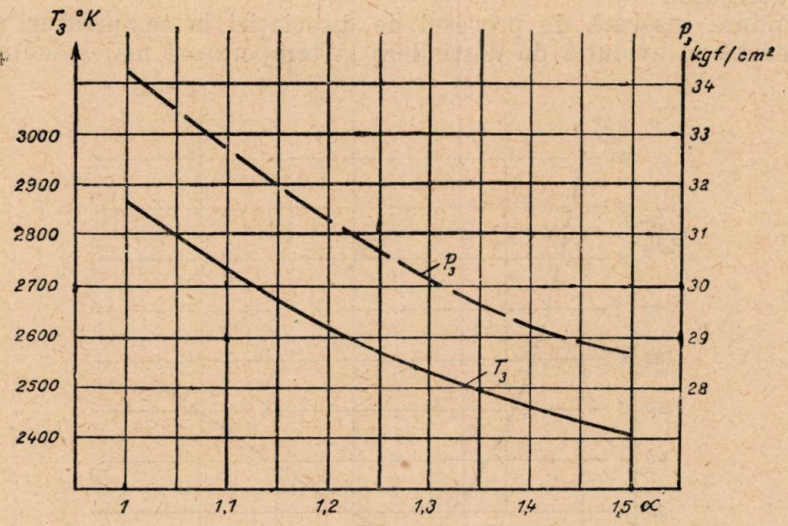



Fig. 11. — Variația temperaturii maxime $T_3$ și a presiunii maxime $p_3$ în procesul de ardere, în funcție de coeficientul excesului de aer.

Viteza frontului de flacără este modificată de variația dozajului. Nu există o posibilitate simplă de a aprecia variația acestui element în mod analitic; vom presupune că se poate restabili (măcar în plină sarcină și la variații mici ale dozajului) viteza frontului de flacără, prin intermediul variației avansului la aprindere.

Un alt factor de care depinde coeficientul $\varphi$ și care este mult influențat de variația excesului de aer este disociația. Sărăcirea dozajului duce la următoarele influențe asupra disociației:

— scăderea disociației, ca urmare a mișcării temperaturii maxime din procesul de ardere;

— creșterea disociației, ca urmare a micșorării presiunii maxime din procesul de ardere;

— creșterea disociației, ca urmare a mărimii cantității de substanță inertă.

În figura 11 se prezintă variația temperaturii maxime $T_3$ și a presiunii maxime $p_3$ din procesul de ardere, calculată în ipoteza unui ciclu ideal cu gaze perfecte.

Deși presiunea $p_3$ și numărul de kilomoli de gaze inerte au efect antagonist temperaturii, ele nu pot contrabalansa efectul scăderii acesteia,

asupra valorii constantei de echilibru, aşa cum se arată în figura 12 pentru un caz simplu, în care s-a considerat numai un echilibru chimic

$$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightleftarrows CO_2$$

Ca urmare, căldura cheltuită în procesul de disociaţie scade cu sărăcirea dozajului.

Căldura mascată de procesul de disociaţiei la temperaturi ridicate este cedată în evoluţia de destindere la temperaturi mai scăzute, adică

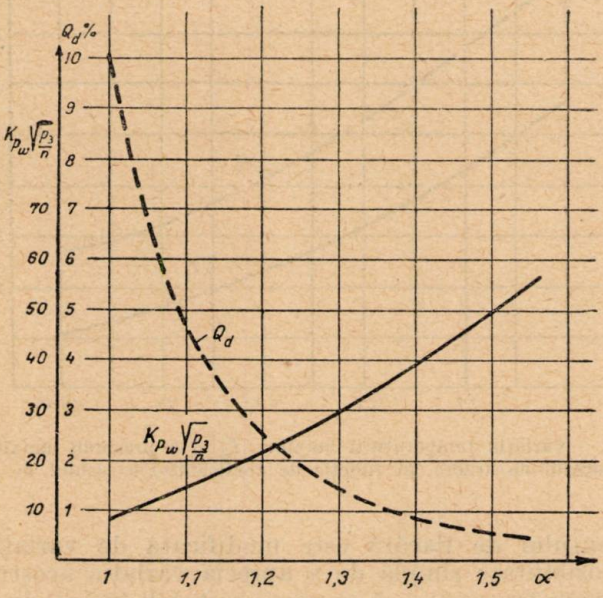



Fig. 12. — Variaţia căldurii absorbite în procesul de disociaţie $Q_d$ şi a termenului $k_{p_{CO}}\sqrt{\frac{p_3}{n}}$ cu valoarea coeficientului excesului de aer.

randamentul său de transformare în lucru mecanic, scade. Ca urmare, a disocierilor în cursa de destindere, influenţa variaţiei gradului de disociaţie asupra lucrului mecanic dezvoltat pe ciclu este suficient de mică. În consecinţă nu se va întreprinde calculul laborios [9] al determinării gradului de disociere.

**2.2.4** Randamentul mecanic suferă în general o variaţie, ca urmare a micşorării puterii indicate cu sărăcirea dozajului. Deoarece şi pierderile mecanice scad, ca urmare a scăderii presiunii în cilindru, se poate presupune că randamentul mecanic rămîne constant.

**2.2.5.** Din analiza făcută rezultă că în cazul modificării coeficientului excesului de aer, se poate aprecia analitic variaţia căldurii degajate prin arderea amestecului proaspăt şi variaţia randamentului volumetric.

Se poate cuprinde această variație sub forma unui coeficient $\psi$ (fig. 13). Deoarece factorii menționați mai sus afectează lucrul mecanic pe ciclu, se va numi coeficientul $\psi$ coeficient de micșorare al puterii.

La baza acestui coeficient $\psi$ stau termenii : $\psi_v$ — coeficientul de micșorare al randamentului volumetric

$$\psi_v = \frac{\eta v_\alpha}{\eta v_{\alpha=1}}$$

și

$\psi_Q$ — coeficientul de micșorare al căldurii degajate prin ardere

$$\psi_Q = \frac{Q_\alpha}{Q_{\alpha=1}},$$

coeficientul de micșorare al puterii calculîndu-se cu relația

$$\psi = \psi_v \cdot \psi_Q. \qquad (1)$$

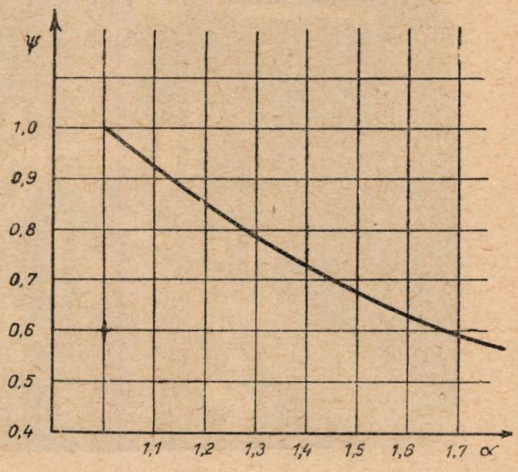



Fig. 13. — Valoarea coeficientului de micșorare a puterii în funcție de coeficientul excesului de aer.

Puterea pentru dozaje diferite poate fi apreciată cu relația

$$Pe_\alpha = Pe_{\alpha=1}\,\psi. \qquad (2)$$

### 3. REZULTATE EXPERIMENTALE

Pentru a se studia experimental influența dozajului asupra puterii, duza de control a amestecătorului (fig. 14) a fost prevăzută cu un ac profilat *a*, reglabil, care permite să se varieze cantitatea de gaze naturale, pentru aceeași cantitate de aer aspirat.

Experimentările s-au condus la turație constantă (pentru a satisface ipoteza presupusă la studiul randamentului volumetric) și la deschiderea completă a obturatorului, avansul la aprindere fiind optim. Dozajul s-a determinat prin măsurarea concomitentă a debitului de aer și de combustibil. Varierea dozajului s-a efectuat pînă în punctul în care funcționarea motorului a devenit instabilă. Se constată că indiferent de turație (fig. 15) motorul se desprinde la valori ale coeficientului excesului de aer, $\alpha = 1{,}7$.

Pe aceeași figură s-a trasat și puterea apreciată prin intermediul coeficientului de micșorare a puterii $\psi$, cu relația (2).

Curbele prezentate indică scăderea puterii cu excesul de aer. Se remarcă două regiuni :

Prima regiune cuprinsă între $\alpha = 1$ și $\alpha = 1{,}4$ este caracterizată de coincidența mulțumitoare între valorile măsurate ale puterii și cele calculate : regiunea a doua pentru $\alpha > 1{,}4$, în care puterea măsurată scade mult mai repede ca cea calculată.

★

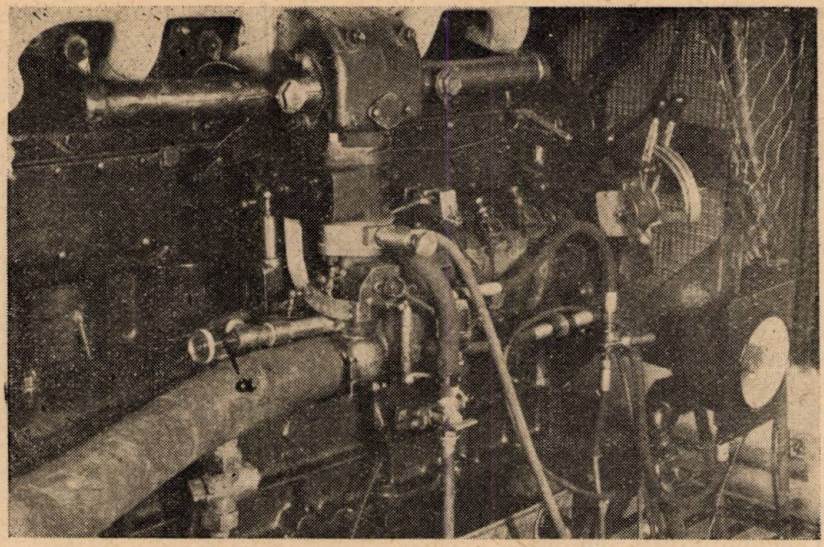



Fig. 14. — Amestecătorul de gaze naturale cu acul profilat *a* pentru varierea debitului de combustibil.

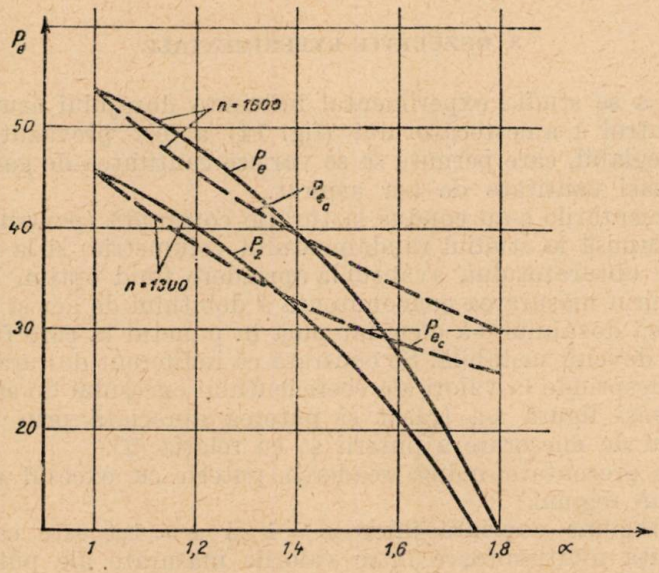



Fig. 15. — Puterea efectivă a motorului funcţionînd cu gaze naturale în funcţie de coeficientul excesului de aer (linie plină — valori măsurate, linie întreruptă — valori calculate cu relaţia (2)).

Din studiul efectuat rezultă că în domeniul exceselor mici de aer ($\alpha = 1 \div 1{,}4$) valoarea puterii, pe care o va avea motorul funcționînd cu gaze naturale, se poate calcula cu aproximație mulțumitoare, considerînd numai influența aportului de căldură.

Pentru o precizie de calcul mai bună se poate considera și influența variației randamentului volumetric, care scade dacă amestecul sărăcește. Această scădere a randamentului volumetric se explică fizic prin faptul

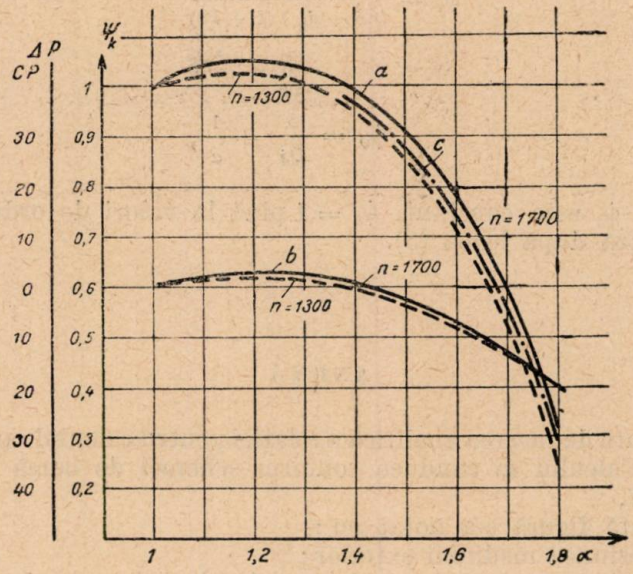



Fig. 16. — Variația factorului de corecție ($a$) a curbei matematice ($c$) calculată după relația (2), și a diferenței în cai putere între puterea efectivă măsurată și cea calculată ($b$) în funcție de coeficientul excesului de aer.

că gazele arse au o contracție mai redusă, dacă lipsesc gazele naturale din amestec, deoarece căldura specifică a acestora este mai mare și absorb o cantitate mai mare de căldură de la gazele arse decît ar absorbi aerul curat.

Domeniul de valori ale coeficientului excesului de aer $\alpha = 1 \div 1{,}4$ este domeniul ce interesează funcționarea corectă a motoarelor, el reprezentînd un domeniu de scădere redusă a puterii și de economicitate în funcționare; în acest domeniu calculul se poate face cu valorile coeficientului de micșorare a puterii din figura 16.

Pentru cercetarea puterii în domenii $\alpha > 1{,}4$ se propune introducerea unui nou coeficient de micșorare a puterii, dedus experimental din curbele prezentate în figura 16.

Acest coeficient de micșorare a puterii, $\psi_k$, are valoarea experimentală

$$\psi_k = -1 + 2{,}19\ \alpha - 0{,}878\ \alpha^2 \qquad (3)$$

și este valabil de la coeficientul excesului de aer $\alpha = 1{,}4$ pînă la desprinderea motorului. Prin urmare, funcționarea motorului cu gaze naturale

în domeniul dozajelor sărace poate fi dedusă pe bază de calcul, folosindu-se relaţia

$$P_{e\alpha} = P_{e\alpha=1} \cdot \psi_v \cdot \psi_Q \cdot \psi_k . \tag{4}$$

În această expresie $\psi_v$ şi $\psi_Q$ se calculează cu relaţiile simple

$$\psi_v = \frac{(1 + kd_\alpha)(\varkappa\delta + d)}{(\varkappa\delta + d_\alpha)(1 + kd)}$$

şi

$$\psi_Q = \frac{\frac{Q_d}{\alpha}}{Q_d} = \frac{1}{\alpha},$$

iar termenul $\psi_k$ este constant, $\psi_k = 1$ pînă la valori de ordinul $\alpha \cong 1{,}4$ şi apoi variază după legea (3).

## ANEXĂ

Se prezintă deducerea analitică a relaţiei pentru calculul randamentului volumetric. Calculul se conduce conform schemei de cursă de aspiraţie din figura 17.

În această figură s-a notat cu :

$p_e$ — presiunea mediului exterior ;

$p_i$ — presiunea cea mai mică atinsă în timpul aspiraţiei ;

$p_r$ — presiunea gazelor reziduale la începutul cursei de aspiraţie ;

$p_a$ — presiunea amestecului la sfîrşitul cursei de aspiraţie.

Se efectuează pe această cursă un bilanţ energetic, în care scop se folosesc notaţiile :

$U$ [kcal] — energia internă a aerului introdus pînă în punctul $a$, măsurată în condiţiile exterioare motorului ;

$U_k$ [kcal] — energia internă a combustibilului, măsurată în condiţiile exterioare motorului ;

$U_r$ [kcal] — energia internă a gazelor arse, măsurată în condiţiile punctului $r$ ;

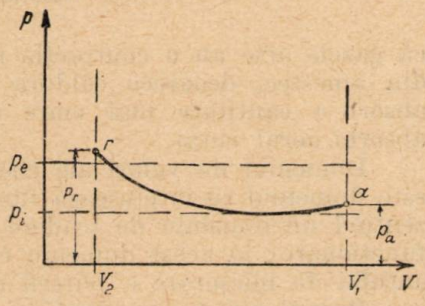



Fig. 17. — Schema de calcul pentru expresia randamentului volumetric.

$AW$ [kcal] — energia cinetică a aerului ;

$AW_k$ [kcal] — energia cinetică a combustibilului ;

$AL_i$ [kcal] — lucrul mecanic de deplasare al aerului ;

$AL_k$ [kcal] — lucrul mecanic de deplasare al combustibilului ;

$\Delta Q$ [kcal] — cantitatea de căldură primită de amestec în timpul cursei de admisie ;

$U_a$ [kcal] — energia internă a amestecului de aer, combustibil și de gaze arse, determinată în punctul $a$;

$AW_a$ [kcal] — energia cinetică a amestecului carburat la sfîrșitul cursei de aspirație;

$AL_a$ [kcal] — lucrul mecanic schimbat cu exteriorul pînă la sfîrșitul cursei de aspirație.

Bilanțul energetic se scrie:

$$U + U_k + U_r + AW + AW_k + AL_i + AL_k + \Delta Q = U_a + AW_a + AL_a.$$

Se consideră

$$AW \cong AW_a,$$
$$AW_k \cong 0,$$
$$AL_k \cong 0$$

și se capătă expresia

$$U + U_k + U_r + AL_i + \Delta Q = U_a + AL_a. \qquad (5)$$

Se explicitează această expresie în ipoteza gazelor ideale; se notează

$m_1$ [kg] — cantitatea de aer din punctul $a$;

$m$ [kg] — cantitatea de aer din cilindru, la închiderea supapei de aspirație;

$c_v$, $c_p$ $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg grd}}\right]$ — căldurile specifice ale aerului;

$T_e$ [°K] — temperatura cu care vine aerul din mediul exterior;

$R$ $\left[\frac{\text{kgm}}{\text{kg °K}}\right]$ — constanta aerului;

$m_k'$ [kg] — cantitatea de combustibil în punctul $a$;

$m_k$ [kg] — cantitatea de combustibil în cilindru, în punctul de închidere a supapelor de evacuare;

$c_{v_k}$, $c_{p_k}$ $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg·grd}}\right]$ — căldurile specifice ale combustibilului;

$T_k$ [°K] — temperatura combustibilului;

$R_k$ $\left[\frac{\text{kgm}}{\text{kg°K}}\right]$ — constanta combustibilului;

$m_r$ [kg] — cantitatea de gaze reziduale;

$c_{v_r}$, $c_{p_r}$ $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg·grd}}\right]$ — căldurile specifice ale gazelor reziduale;

$T_r$ [°K] — temperatura gazelor reziduale;

$R_r$ $\left[\frac{\text{kgm}}{\text{kg °K}}\right]$ — constanta gazelor reziduale;

$m_a$ [kg] — cantitatea de amestec din punctul $a$;

$c_{v_a}$, $c_{p_a}$ $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{kg·grd}}\right]$ — căldurile specifice ale amestecului;

$T_a$ [°K] — temperatura amestecului;

$R_a$ $\left[\frac{\text{kgm}}{\text{kg°K}}\right]$ — constanta amestecului;

$\Delta T$ [grd] — creșterea de temperatură datorită încălzirii de la motor a amestecului.

Cu notaţiile de mai sus se pot scrie energiile interne

$$\begin{aligned} U &= m_1 c_v T_e, \\ U_r &= m_r c_{v_r} T_r, \\ U_k &= m'_k c_{v_k} T_k, \\ U_a &= m_a c_{v_a} T_a. \end{aligned} \tag{6}$$

Cantitatea de căldură schimbată

$$\Delta Q = (m_1 c_p + m'_k c_{p_k}) \Delta T. \tag{7}$$

Lucrul mecanic de deplasare

$$AL_i = Ap_a V = Ap_a \frac{m_1}{\rho_a} = Ap_a m_1 \frac{RT_e}{p_a} = Am_1 RT_e. \tag{8}$$

Lucrul mecanic schimbat cu exteriorul:

$$AL_a = Ap_a V_p \mu, \tag{9}$$

unde coeficientul $\mu$ corectează valoarea lucrului izobar $Ap_aV_p$ la valoarea reală a lucrului mecanic schimbat pe cursa de aspiraţie şi $V_p$ — cilindreea.

Prin introducerea relaţiilor (6), (7), (8) şi (9) în (5) se obţine:

$$\begin{aligned} m_1 c_v T_e + m'_k c_{v_k} T_e + m_r c_{v_r} T_r + Am_1 RT_e + (m_1 c_p + m'_k c_{p_k}) \Delta T = \\ = m_a c_{v_a} T_a + Ap_a V_p \mu. \end{aligned} \tag{10}$$

Se consideră raportul $\lambda$ dintre cantitatea de aer (sau combustibil) la finele evoluţiei de aspiraţie şi cea de aer (sau combustibil) la finele cursei de aspiraţie:

de unde

$$\left.\begin{aligned} \lambda &= \frac{m}{m_1} = \frac{m_k}{m'_k}, \\ m_1 &= \frac{m}{\lambda}, \\ m'_k &= \frac{m_k}{\lambda}. \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

Se consideră noţiunea de dozaj $d = \frac{m_k}{m}$, de unde

$$m_k = dm. \tag{12}$$

Ţinînd seama de relaţiile (11) şi (12), (10) devine

$$\begin{aligned} \frac{m}{\lambda} c_v T_e + \frac{md}{\lambda} c_{v_k} T_e + m_r c_{v_r} T_r + A \frac{m}{\lambda} RT_e + \frac{m}{\lambda} (c_p + dc_{p_k}) \Delta T = \\ = m_a c_{v_a} T_a + Ap_a V_p \mu. \end{aligned} \tag{13}$$

Se introduce [4] noțiunea de randament volumetric pentru aer, $\eta_v'$, și pentru amestec, $\eta_v$

$$\frac{\eta_v}{\eta_v'} = 1 + kd,$$

unde cu $k = \frac{R_k}{R_a}$ s-a notat un termen constant care depinde de natura combustibilului; se obține

$$\eta_v' = \frac{\eta_v}{1 + kd}, \tag{14}$$

unde conform definiției ($m_t$ = cantitatea teoretică de aer în cilindru)

$$\eta_v' = \frac{m}{m_t}$$

și deci

$$m = \eta_v' m_t.$$

Ținîndu-se seama de condițiile exterioare $p_e$ și $T_e$, se obține:

$$p_e V_p = m_t R T_e$$

sau

$$m_t = \frac{p_e V_p}{R T_e}$$

și ținînd seama de relația (14)

$$m = \frac{p_e V_p}{R T_e} \frac{\eta_v}{1 + kd}. \tag{15}$$

Se exprimă legea gazelor perfecte în punctul $r$:

$$m_r T_r = \frac{p_r V_2}{R_r} \sigma, \tag{16}$$

unde $\sigma$ este un termen care precizează cît din volumul camerei de ardere este ocupat de gazele arse.

Se exprimă legea gazelor perfecte și în punctul $a$

$$m_a T_a = \frac{p_a V_1}{R_a}. \tag{17}$$

Se introduc expresiile (15), (16) și (17) în (13) și se găsește

$$\frac{1}{\lambda} \frac{\eta_v}{1 + kd} \frac{p_e V_p}{R T_e} c_v T_e + \frac{\eta_v}{1 + kd} \frac{d}{\lambda} \frac{p_e V_p}{R T_e} c_{v_k} T_e + \frac{p_r V_r}{R_r} \sigma c_{v_r} +$$

$$+ A R T_e \frac{1}{\lambda} \frac{p_e V_p}{R T_e} \frac{\eta_v}{1 + kd} + \frac{1}{\lambda} \frac{p_e V_p}{R T_e} \frac{\eta_v}{1 + kd} (c_p + d c_{p_k}) = \frac{p_a V_1}{R_a} c_{v_a} + A p_a V_p \mu.$$

Printr-o grupare convenabilă a termenilor din expresia de mai sus şi prin înlocuirea valorii $\frac{c_v}{R} + A = \frac{c_p}{R}$ se obţine

$$\frac{1}{\lambda}\frac{c_p}{R}\frac{\eta_v}{1+kd}p_eV_p + \frac{d}{\lambda}\frac{\eta_v}{1+kd}\frac{p_eV_p}{R}c_{v_k} + \frac{p_rV_2}{R_r}\sigma c_{v_r} +$$

$$+\frac{\eta_v}{1+kd}\frac{1}{\lambda}\frac{p_eV_p}{RT_e}(c_p + dc_{p_k})\,\Delta T = c_{v_a}\frac{p_aV_1}{R_a} + Ap_aV_p\,\mu. \qquad (18)$$

În expresia de mai sus se consideră $dc_{p_k}$ mic faţă de $c_p$ şi se neglijează. Se poate considera cu suficientă aproximaţie :

$$\frac{c_v}{R} = 0{,}00584 \cong \frac{c_{v_r}}{R_r} = 0{,}00673 \cong \frac{c_{v_k}}{R_k} = 0{,}0074 \cong \frac{c_{v_a}}{R_a} = 0{,}0065.$$

Se împarte cu $\frac{c_v}{R}$ şi se ţine seama că $\frac{AR}{c_v} = \varkappa - 1$.
Cu aceste operaţii, expresia (18) devine

$$\varkappa\frac{\eta_v}{1+kd}\frac{1}{\lambda}p_eV_p + \frac{d}{\lambda}\frac{\eta_v}{1+kd}p_eV_p + p_rV_2\sigma + \varkappa\frac{\eta_v}{1+kd}\frac{1}{\lambda}p_eV_p\frac{\Delta T}{T_e} =$$

$$= p_aV_1 + (\varkappa - 1)\,p_aV_p\,\mu,$$

sau prin gruparea factorilor

$$\varkappa\frac{\eta_v}{1+kd}\frac{1}{\lambda}p_eV_p\,\delta + \frac{d}{\lambda}\cdot\frac{\eta_v}{1+kd}p_eV_p + p_rV_2\sigma =$$

$$= p_aV_1 + (\varkappa - 1)\,p_aV_p\,\mu, \qquad (19)$$

unde s-a notat cu $\delta = 1 + \frac{\Delta T}{T_e} = \frac{T_e + \Delta T}{T_e}$ gradul de încălzire a amestecului în motor.

Din expresia (19) se poate obţine valoarea randamentului volumetric

$$\eta_v = \frac{\lambda}{p_eV_p}\frac{1+kd}{\varkappa\delta + d}\left[p_aV_1 + (\varkappa - 1)\,p_aV_p\,\mu - p_rV_2\sigma\right];$$

ţinîndu-se seama de relaţiile cunoscute

$$\frac{V_1}{V_2} = \varepsilon \qquad \text{şi} \qquad \frac{V_p}{V_2} = \varepsilon - 1,$$

scoţîndu-se factor comun $p_aV_2$ şi notîndu-se $\mu\,(\varkappa - 1) = B$ se obţine, pentru randamentul volumetric expresia simplă

$$\eta_v = \frac{\lambda}{\varepsilon - 1}\frac{1+kd}{\varkappa\delta + d}\frac{p_a}{p_e}\left[\varepsilon\,(1 + B) - B - \frac{p_r}{p_a}\sigma\right], \qquad (20)$$

în care apare explicit influenţa dozajului.

# ВЛИЯНИЕ ТОЩИХ ДОЗИРОВОК НА ХАРАКТЕРИСТИКУ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ С ЗАЖИГАНИЕМ ИСКРОЙ, РАБОТАЮЩИХ НА ЖИДКОМ ТОПЛИВЕ, ПРИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИИ НА ПРИРОДНЫЕ ГАЗЫ

## (КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Авторы приводят и истолковывают экспериментальные результаты, полученные при переключении на питание природными газами двигателя с зажиганием искрой, работающего на бензине.

Исследуется область тощих дозировок и указывается метод расчета мощности двигателя при разных значениях коэффициента избытка воздуха, когда известна мощность при значении $\alpha=1$ (зависимость 4).

В основе этой зависимости лежат коэффициенты уменьшения мощности, вследствие развивающегося тепла ($\psi_a$), вследствие объемного выхода ($\psi_v$) и вследствие прочих параметров, влияющих на мощность ($\psi_k$).

Устанавливаются расчетные значения для первых двух параметров и выводится опытное значение для $\psi_k$ (зависимость 3).

Авторы приходят к выводу, что до значений коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1{,}4$ достаточно для технического приближения учитывать только влияние развивающегося тепла и, возможно, влияние объемного выхода.

Если $\alpha > 1{,}4$, необходимо внести опытную поправку, выражающуюся членом $\psi_k$.

В статье представлены подробные опытные данные для работ по испытанию двигателей на питание природными газами; в приложении указан способ вывода аналитической зависимости для расчета объемного выхода, выявляющей влияние дозировки.

## ОБЬЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1. — Смеситель природных газов для обеспечения работы под нагрузкой.

Рис. 2. — Опытный стэнд; общий вид.

Рис. 3. — Полигон для измерения природных газов. *а* — ветвь для измерения объемным счетчиком; *b* — ветвь для измерения диафрагмой.

Рис. 4. — Магнетоиспытываемого двигателя, с переменным опережением зажигания и запуском вручную.

Рис. 5. — Измененный карбюратор, позволяющий работать как на бензине, так и на природных газах. *а* — газопровод для работы под нагрузкой; *в* — газопровод для работы на тихом ходу.

Рис. 6. — Внешняя характеристика при работе двигателя Рено на бензине и на природных газах.

Рис. 7. — Изменения температуры отходящих газов и мощности двигателя в зависимости от опережения зажигания в случае бензина и газа-метана.

Рис. 8. — Количество тепла, развиваемое сгоранием одного кубометра свежей смеси (воздух — бензин и воздух — газ-метан), при различных значениях коэффициента избытка воздуха.

Рис. 9. — Потеря теплого эффекта, отнесенная к теплу, развивающемуся при теоретическом сгорании смесей воздуха с природными газами в различных дозировках, — в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

Рис. 10. — Относительное изменение объемного выхода в зависимости от значения коэффициента избытка воздуха.

Рис. 11. — Изменения температуры $T_3$ и давления $p_3$ в процессе сгорания, в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

Рис. 12. — Изменения тепла, поглощаемого в процессе диссоциации $Q_d$ и значения члена $K_{pco}\sqrt{\frac{p_3}{n}}$ в зависимости от значения коэффициента избытка воздуха.

Рис. 13. — Значение коэффициента снижения мощности в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

Рис. 14. — Смеситель природных газов с фасонной иглой ($a$) для изменения дебита топлива.

Рис. 15. — Эффективная мощность двигателя, работающего на природных газах, в зависимости от коэффициента избытка воздуха (сплошная линия — измеренные значения; прерывистая линия — значения, вычисленные при помощи зависимости 2).

Рис. 16. — Изменения коэффициента поправки ($a$), математической кривой, вычисленной при помощи зависимости ($c$) и разница в лошадиных силах между измеренной эффективной мощностью, и расчетной эффективной мощностью, в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

Рис. 17. — Расчетная схема для определения объемного выхода.

## INFLUENCE DES DOSAGES PAUVRES SUR LA CARACTÉRISTIQUE DE PUISSANCE DES MOTEURS À COMBUSTIBLE LIQUIDE AVEC ALLUMAGE PAR ÉTINCELLE, TRANSFORMÉS POUR FONCTIONNER AUX GAZ NATURELS

(RÉSUMÉ)

Les auteurs présentent et interprètent les résultats expérimentaux obtenus en passant à l'alimentation aux gaz naturels d'un moteur à allumage par étincelle et fonctionnant à l'essence.

On étudie le domaine des dosages pauvres et l'on indique une méthode de calcul de la puissance du moteur pour différentes valeurs du coefficient de l'excès d'air, quand on connaît la puissance pour la valeur $\alpha = 1$ (relation 4).

A la base de cette relation, se trouvent les coefficients de diminution de la puissance, due à la chaleur développée $\psi_a$, celle due au rendement volumétrique $\psi_v$ et celle due aux autres paramètres qui influencent la puissance $\psi_k$.

On établit des valeurs de calcul pour les deux premiers paramètres et on déduit une valeur expérimentale pour $\psi_k$ (relation 3).

Les auteurs aboutissent à la conclusion que, pour des valeurs du coefficient de l'excès d'air allant jusqu'à $\alpha = 1{,}4$, il est suffisant, pour l'approximation technique, de prendre en discussion uniquement l'influence de la chaleur développée et, éventuellement, celle du rendement volumétrique.

Au-dessus de cette valeur du coefficient d'excès d'air ($\alpha > 1{,}4$), il est nécessaire d'appliquer une correction expérimentale exprimée par le terme $\psi_k$.

Dans le texte de cet article, on présente la base expérimentale développée pour les travaux d'essai des moteurs fonctionnant aux gaz naturels et, dans l'annexe, la voie pour déduire une relation analytique pour le rendement volumétrique qui mette en relief l'influence du dosage.

## EXPLICATION DES FIGURES

Fig. 1. — Mélangeur de gaz naturels pour assurer le fonctionnement en charge.
Fig. 2. — Banc d'essai ; vue générale.
Fig. 3. — Polygone de mesure des gaz naturels
*a*) branche pour la mesure par compteur volumétrique
*b*) branche pour la mesure à diaphragme.
Fig. 4. — Magnéto du moteur essayé, à avance variable, commandé à la main.
Fig. 5. — Carburateur modifié pour permettre le fonctionnement tant à l'essence qu'aux gaz naturels
*a*) conduite des gaz naturels pour la marche en charge
*b*) conduite des gaz naturels pour la marche au ralenti.
Fig. 6. — Caractéristique externe pour le fonctionnement du moteur Renault à l'essence et aux gaz naturels.
Fig. 7. — Variation de la température des gaz brûlés et de la puissance du moteur en fonction de l'avance à l'allumage pour l'essence et le méthane.
Fig. 8. — Quantité de chaleur développée par combustion d'un mètre cube de mélange frais (air - essence et air - méthane) pour différentes valeurs du coefficient de l'excès d'air.
Fig. 9. — Perte d'effet thermique rapportée à la chaleur développée dans le cas de la combustion théorique pour des mélanges à dosages variés, d'air-gaz naturels en fonction du coeficient d'excès d'air.
Fig. 10. — Variation relative du rendement volumétrique en fonction de la valeur du coefficient de l'excès d'air.
Fig. 11. — Variation de la température $T_3$ et de la pression maximum $p_3$ dans le processus de combustion, en fonction du coefficient d'excès d'air.
Fig. 12. — Variation de la chaleur absorbée dans le processus de dissociation $Q_d$ et du terme $k_{TCO}\sqrt{\frac{p_3}{n}}$, avec la valeur du coefficient d'excès d'air.
Fig. 13. — Valeur du coefficient de diminution de la puissance en fonction du coefficient de l'excès d'air.
Fig. 14. — Mélangeur de gaz naturels à aiguille profilée (*a*), pour faire varier le débit de combustible.
Fig. 15. — Puissance effective du moteur fonctionnant aux gaz naturels, en fonction du coefficient de l'excès d'air (Trait plein = valeurs mesurées, trait interrompu = valeurs calculées par la relation (2).
Fig. 16 — Variation du facteur de correction (*a*), de la courbe mathématique calculée d'après la relation 2 (*c*) et de la différence en chevaux-vapeur entre la puissance effective mesurée et celle calculée (*b*), en fonction du coefficient de l'excès d'air.
Fig. 17. — Schéma de calcul pour l'expression du rendement volumétrique.

## BIBLIOGRAFIE

1. A. Strelnikov, *Ispolzovanie zjijonogo gaza v rabote avtotransporta.* Avtomobil, 1951, nr. 1, p. 4—7.
2. M. Koslakov, *Gazobalonhti avtomobil ZIS — 156,* Avtomobil, 1950, nr. 8. p. 18—21.
3. G. I. Samoli I. I. Goldblat, *Primenenie goriucih gazov v avtotraktornîh dvigateleah,* Gostoptehizdat. Moscova-Leningrad, 1952.
4. T. M. Melkumov, *Teoria aviationnîh porşnevîh dvigatelei.* Moscova, 1953.
5. V. N. Boltinski, *Motoare de tractoare şi automobile.* Ed. tehnică, Bucureşti, 1955, p. 635.
6. Hans List, *Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine,* J. Springer, Viena, 1939, p. 124.
7. M. M. Maslennikov şi M. S. Rapiport, *Motoare cu piston pentru aviaţie.* Ed. tehnică, Bucureşti, 1953, vol. I, p. 489.
8. A. Schnürle, *Die Gasmaschine.* J. Springer, Viena, 1939, p. 114.
9. G. Bărănescu, *Calculul proceselor de ardere.* Ed. Acad. R.P.R., Bucureşti, 1955.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 3, 1956

*COMBUSTIBILI ŞOLIZI*

# STUDIUL CHIMIC ŞI TEHNOLOGIC AL TURBELOR DIN R.P.R.

## NOTA II

## PRELUCRĂRI MECANICE ŞI PROCESE CHIMICO-TEHNOLOGICE APLICATE TURBELOR DIN R.P.R.

DE

I. BLUM, FR. BOLCHI, I. EPURE, C. GHEORGHIŢĂ, M. GOLDŞTEIN, M. GORUNEANU, N. IONESCU, H. MANDEL, TH. PIATKOWSKI şi N. SÎRBU

În nota I [1], ne-am ocupat de caracteristicile chimico-tehnice şi de gradul de turbificare ale zăcămintelor de turbă din R.P.R., iar în nota de faţă ne ocupăm de valorificarea lor.

Am văzut că, datorită puterii calorifice ridicate, la turba uscată în aer, procentului mic de sulf şi conţinutului redus de cenuşă al unor zăcăminte, turbele pot fi utilizate drept combustibil, în focare industriale cu o construcţie şi adaptare specială a grătarelor, sau la ars în uz casnic, în sobe cu focare de mare volum.

Aceasta ar fi una din cele mai importante utilizări ale turbei, sub formă de material brut, neprelucrat, utilizare locală însă, din cauza neeconomicităţii transportului, ţinînd seama de volumul extrem de mare ce-l ocupă pentru o greutate redusă.

În cazul consumatorului la distanţă se impune însă prelucrarea turbei, ca brichete crude, semicocs sau cocs de brichete.

Avînd în vedere aceste considerente şi pentru rezolvarea celei de-a doua teme a lucrării (nota II) turbele analizate au fost supuse unor prelucrări mecanice, precum şi unor procese chimico-tehnologice ca: brichetarea, semicocsificarea, cocsificarea, extracţii de ceruri şi răşini.

### BRICHETAREA TURBEI *)

#### Pregătirea materialului şi modul de lucru

Iniţial, pentru încercările de brichetare, s-a utilizat turba măcinată la 0—0,2 mm, apoi s-a variat şi granulaţia. Temperatura de brichetare a fost temperatura mediului înconjurător.

*) Lucrările de brichetare au fost efectuate cu turbe ce reprezentau proba medie a zăcămîntului respectiv.

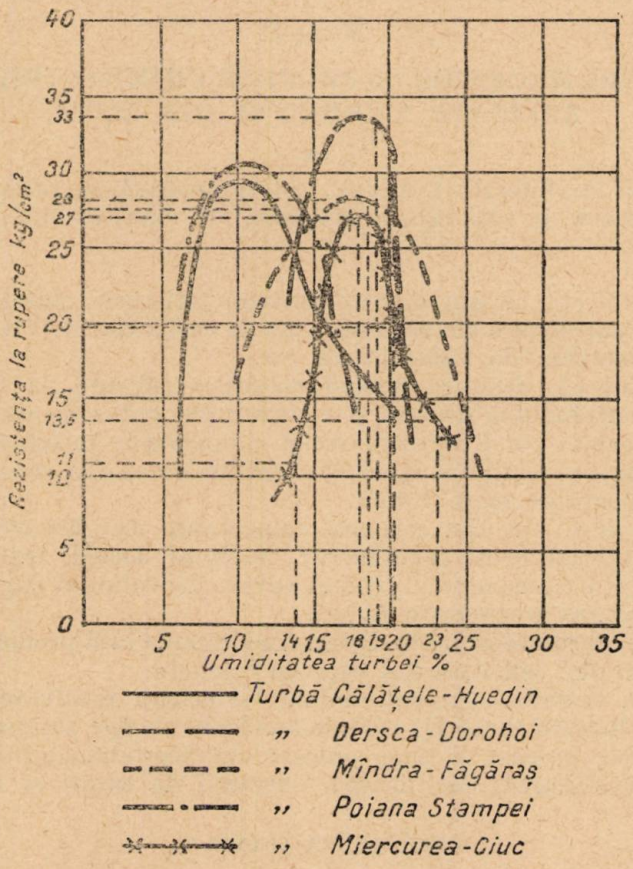
În cursul operațiilor de brichetare s-a urmărit mai întîi stabilirea următoarelor două caracteristici (condiții) de lucru [2] pentru brichetele de turbă din fiecare zăcămînt :

*a*) procentul optim de umiditate al turbei fin măcinate pentru brichetare,

*b*) presiunea optimă de brichetare.

Aceste două caracteristici au fost variate, ceea ce a necesitat un număr considerabil de încercări pînă la obținerea unor brichete cu un maximum de rezistență mecanică. Prin rezistența mecanică am înțeles rezistența la rupere, aruncare și rostogolire.

Din rezultatele obținute s-a constatat că nu este necesar să se ridice presiunea peste 1500 kg/cm², deoarece rezistența mecanică a brichetei nu




Variația rezistenței la rupere în funcție de umiditatea turbei.

mai crește sensibil, uneori chiar descrește. Această ușoară descreștere s-ar putea explica prin mărunțirea mai departe a particulelor de turbă, datorită presiunii, rupîndu-se astfel echilibrul creat între particule și stratul monomolecular de apă adsorbit de particulele de turbă, apă, care cu participarea forțelor legăturilor de hidrogen a jucat rolul de liant în brichetă [3].

De asemenea, se constată că este necesară obținerea unui procent optim de umiditate, pentru o rezistență mecanică maximă.

Dependența dintre procentul optim de umiditate, ca și dintre presiunea de brichetare și rezistența brichetelor de turbă, se poate exprima grafic sub forma unor parabole, cu cîte un maximum fiecare, după cum se vede în diagrama din figură.

În laborator au fost executate brichete cilindrice de două dimensiuni :

*a*) greutatea = 20 g
diametrul ∅ = 4 cm
înălțimea $h$ = 1,2—1,5 mm

*b*) greutatea = 75 g
diametrul ∅ = 6 cm
înălțimea $h$ = 3 cm

Variația lui $h$ se datorește în primul rînd felului turbei (cele mai fibroase și prăfoase totodată, ca Poiana Stampei și în special Călățele-Huedin, au înălțimea cea mai mare) și în al doilea rînd procentului de umiditate. Aspectul brichetelor este frumos și neted.

După stabilirea celor doi factori de lucru, presiunea de brichetare, aceeași pentru toate turbele și procentul optim de umiditate, variabil după caracteristicile probei de zăcămînt, brichetele rezultate au fost supuse la următoarele încercări :

*a*) rezistența la rupere,
*b*) rezistența la aruncare și rostogolire,
*c*) rezistența la foc,
*d*) rezistența la apă.

*a* și *b*). Brichetele posedă o bună rezistență la rupere cuprinsă între 27 și 34 kg/cm² (tabloul nr. 1), la aruncare pe ciment de la 3 m înălțime s-au comportat de asemenea foarte bine, procentul de părți rupte nedepășind valoarea de 5%. Este de remarcat, că ruperea avea loc la marginile ascuțite ale brichetei, ceea ce era inevitabil, dată fiind forma pe care o avea aceasta. Matrițele industriale ovoide sau paralelipipedice dau brichete cu extremitățile mai rotunjite, ceea ce reduce și mai mult procentul de pierderi.

*c*) Arderea în foc a brichetelor a fost încercată într-o sobă de teracotă cu o suprafață de încălzire de 4,2 m². Brichetele se aprind foarte ușor și ard repede, cu o flacără intensă de 8—10 cm. Nu se dezagregă, în timpul arderii păstrîndu-și destul de bine forma. Temperatura maximă a sobei este mai ridicată decît cea obținută la arderea unei cantități egale de lemn.

*d*) Rezistența la apă s-a determinat prin introducerea brichetei în apă și observarea timpului cît ea a rămas fără să se dezagrege. Brichetele crude de turbă nu au rezistat mai mult de cîteva minute.

Încercînd să găsim un procedeu de prelucrare a turbei, înainte sau după brichetare, care să confere brichetei, rezistența la apă, ne-am oprit la cîteva metode indicate de literatura de specialitate, pe care le-am experimentat în laborator asupra turbelor noastre. de exemplu :

*a*) Pregătirea materialului de brichetat printr-o încălzire la circa 80°C, temperatură suficientă pentru evacuarea aerului înglobat de particulele de cărbune, aer care ar împiedica legarea acestor particule [4].

*b*) Incălzirea materialului de brichetat pînă la temperatura de exsudare a gudronului și brichetarea imediată pentru a folosi proprietatea liantă a particulelor de gudron [5].

De asemenea alte tratamente diferite. Nici unul dintre aceste procedee nu a dat vreun rezultat favorabil asupra rezistenței la apă a brichetelor, dimpotrivă, unele micșorau și rezistența mecanică a acestora.

Folosind anumite date experimentale, provenite din cercetări anterioare în laboratorul nostru, s-a aplicat brichetelor un posttratament termic, care a dus la rezultate parţiale în ceea ce priveşte rezistenţa la apă a brichetelor.

Trebuie menţionat, că variaţia regimului de temperatură la care au fost supuse aceste brichete, cît şi a timpului de expunere a lor la temperatura indicată, aducea variaţii în aspectul fizic şi rezistenţa mecanică a brichetelor.

S-a constatat că este favorabil regimul rapid de temperatură, atît la încălzirea, cît şi la răcirea brichetelor.

Ce se înţelege prin rezultate parţiale : posttratamentul s-a dovedit eficace la turbele de Poiana Stampei, care fără a-şi diminua în mod supărător rezistenţa mecanică (o oarecare micşorare a acesteia are loc prin pierderea apei) o cîştigă în schimb şi pe cea la apă, rezistînd fără descompunere şi fără o creştere mare a volumului, timp de 24 de ore. Astfel au fost considerate aceste brichete ca avînd o foarte bună rezistenţă la apă.

În cazul brichetelor de Călăţele-Huedin, rezultatul posttratamentului a fost bun şi nu foarte bun, adică brichetele respective prezintă o uşoară creştere în înălţime (circa 0,5 mm) din cauza unor mici crăpături transversale ; acestea fac ca după o şedere de 24 de ore în apă să se observe o nouă creştere pe dimensiuni ; totuşi bricheta este întreagă şi neprăfuită după uscare, cînd se strînge puţin, dar nu revine întocmai la dimensiunile iniţiale.

În ceea ce priveşte celelalte turbe, rezultatele sînt redate în tabloul nr. 1, care sintetizează rezultatele numeroaselor încercări efectuate asupra tuturor zăcămintelor de turbă.

*Tabloul nr. 1*

**Brichetarea fără liant a turbelor din R. P. R.**

| Denumirea zăcămîntului | Presiunea optimă de brichetare kg/cm² | Umiditate optimă de brichetare % | Rezistenţa | | | Observaţii |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | la rupere kg/cm² | la apă $R_a$ | la foc $R_f$ | |
| Poiana Stampei . . | 1 500 | 10,5—11 | 29,5 | f. bună | f. bună | Este suficient un posttratament de 2 ore. Brichetele au fost reproductibile |
| Miercurea-Ciuc . . | 1 500 | 18—19 | 27,1 | f. slabă | bună | Posttratamentul nu îmbunătăţeşte rezistenţa la apă |
| Mîndra-Făgăraş . . | 1 500 | 18,6 | 27,7 | f.bună *) | f. bună | Este necesar un posttratament la o temperatură ceva mai scăzută |
| Călăţele-Huedin . . | 1 500 | 10 | 30 | bună | f. bună | Durata posttratamentului trebuie prelungită la 3 ore |
| Dersca-Dorohoi . . | 1 500 | 19 | 33,6 | bună *) | bună | Posttratamentul necesită o temperatură mai ridicată cu circa 10°C |

*) Ireproductibilă — în încercările ulterioare, cu turbă nouă, a dat o rezistenţă acceptabilă.

Pentru stabilirea procentului optim de umiditate, din cauza uscării prea înaintate a turbelor în laborator, acestea au trebuit umectate ; umectarea a fost făcută cu un pulverizator. Totuşi structura internă a particulelor se poate să fi fost alta decît cea a turbei cu umiditatea naturală şi aceasta poate fi una din cauzele ireproductibilităţii rezultatelor, după cum s-a văzut în tabloul nr. 1.

În cursul lucrărilor de brichetare s-au mai făcut încă cîteva constatări interesante şi anume :

*a*) Variaţia procentului optim de umiditate este în funcţie de granulaţia materialului brichetat.

*b*) Nu s-a observat o influenţă determinantă a procentului de cenuşă asupra calităţii brichetei.

*a*) Variind granulaţia turbei pentru brichetare, s-a observat că, pentru a obţine aceleaşi rezultate, este necesar a varia şi procentul optim de umiditate : la turba de Poiana Stampei, pentru o granulaţie de 0—0,5 mm, umiditatea optimă a trebuit ridicată de la 11 pînă la 22% ; la turba de Călăţele-Huedin, pentru aceeaşi granulaţie de 0—0,5 mm, procentul optim de umiditate a trebuit ridicat la 19,7%.

*b*) Variaţia de cenuşă, care nu influenţează calitatea brichetei nu a depăşit 5%.

## CONCLUZII PRIVIND BRICHETAREA

Recapitulînd rezultatele obţinute în urma lucrărilor de brichetare a turbelor noastre, se constată că este posibilă brichetarea lor fără liant (cea mai economică), rezultînd brichete foarte bune în ceea ce priveşte rezistenţa mecanică, brichete care ard bine pe grătar, fără fum şi fără a se mărunţi.

Se observă că la turbele de Călăţele-Huedin şi Poiana Stampei, procentul optim de umiditate, pentru brichetele respective, este mai scăzut decît la celelalte turbe (la care el variază între 18 şi 19%) şi anume, acest procent este de circa 10,5%. Se presupune că această deosebire s-ar datora conţinutului mai scăzut de cenuşă al acestor turbe şi cantităţii mai mari de ceară şi răşini existente.

Pentru turbele ale căror brichete au şi o bună rezistenţă la apă, problema valorificării lor în forma cea mai rentabilă o putem considera ca rezolvată, ele reprezentînd un foarte bun combustibil casnic, cu multe calorii şi cenuşă puţină, foarte rezistent şi cu greutatea volumetrică ridicată. Aceste calităţi, precum şi cele amintite în această lucrare au făcut posibile, în Uniunea Sovietică, cercetările de utilizare a turbei drept combustibil în procesul din furnal [6].

Încercările care s-au făcut şi asupra celorlalte turbe, în vederea obţinerii unor brichete rezistente la apă, credem că pot fi continuate cu şansă de reuşită.

## SEMICOCSIFICAREA ŞI COCSIFICAREA TURBELOR [7] şi [8]

Aceste prelucrări chimico-tehnologice ale turbei au fost efectuate atît pentru stabilirea tuturor posibilităţilor de prelucrare a turbelor, cît

şi pentru completarea studiului de faţă cu încă o serie de date importante asupra produsului solid rezultat, cocsul sau semicocsul şi a subproduselor, gudron şi gaze.

Prin tratarea termică a brichetelor de turbă la temperaturile respective (de cocsificare sau semicocsificare) se obţine un material reactiv, de putere calorifică crescută, sulf puţin şi, la unele turbe, un procent redus de cenuşă.

Cocsul de turbă este bun şi pentru forje, la cimentarea oţelurilor, fabricarea electrozilor, în industria sticlei; din el se poate fabrica cărbune activ cu mare putere de absorbţie (ca şi din turba fin pulverizată), iar experienţele din Uniunea Sovietică au arătat că, cocsul de turbă poate fi perfect utilizabil pentru furnale [6].

Semicocsul poate găsi cea mai largă întrebuinţare în generatorii de gaz ai maşinilor de transport.

Subprodusele de cocsificare şi semicocsificare pot fi de asemenea valorificate. Este mai raţională utilizarea energo-chimică a turbei, prin care la început, din turbă se separă gudronul, care este supus unei prelucrări ulterioare, iar drept combustibil energetic, serveşte gazul, cocsul sau semicocsul (acolo unde este cazul, adică unde acest produs solid îndeplineşte şi condiţiile de rezistenţă mecanică).

Semicocsificarea s-a făcut în retorte Fischer-Schrader [9], la 500°C; s-a lucrat cu cîte 30 g turbă.

Cocsificarea şi determinarea randamentelor de cosificare s-a executat într-o instalaţie adaptată, după aparatura Gray-King [10], folosind cîte 20 g turbă.

Ca urmare a încercărilor de semicocsificare şi cocsificare şi a analizelor efectuate asupra produsului solid, s-au obţinut rezultatele indicate în tablourile nr. 2—7 inclusiv.

## CONCLUZII PRIVIND SEMICOCSIFICAREA

Din analiza comparativă a datelor obţinute la semicocsificarea turbelor se constată că, randamente mai mari de semicocs, de 47—52 % (valorile calculate la masa combustibilă), se obţin la turbele de Miercurea-Ciuc, Mîndra-Făgăraş şi Dersca-Dorohoi; randamente ceva mai reduse găsim la semicocsul de Poiana Stampei şi Călăţele-Huedin, circa 40—42 %.

Turba de Poiana Stampei are în schimb randament mai ridicat în gaz (205 $m^3/t$) şi gudron faţă de celelalte.

Semicocsul are o foarte uşoară tendinţă de aglomerare, conţinut mic de sulf şi putere calorifică ridicată, variind între 6250 şi 7470 kcal/kg ($P_s$ calculată la masa combustibilă). Valorile mai mari de peste 7000 kcal/kg aparţin turbelor de Poiana Stampei şi Călăţele-Huedin.

La semicocsul ca atare, puterea calorifică superioară ($P_s$) variază între 5200 şi 6730 kcal/kg. Şi aici valorile maxime sînt pentru aceleaşi turbe, care au şi un conţinut redus de cenuşă.

În ceea ce priveşte puterea calorifică inferioară ($P_i$), aceasta variază între 6050 şi 7260 kcal/kg. la masa combustibilă, şi între 4600 şi 6500 kcal/kg, la turba ca atare.

La semicocsificarea brichetelor de turbă se obţin rezultate bune pentru trubele de Poiana Stampei şi Mîndra-Făgăraş, mai slabe pentru

*Tabloul nr. 2*

**Semicocsificara turbelor — randamente —**

| Denumirea zăcămîntului | Randament semicocs % | | Randament gudron % | | Randament apă *) % | | Randament gaz m³/t | | Cărbune liber în gudron(extr. cu benzen) % | | Cenușă în gudron % | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | rap. la t. brut. | rap. la m. c. | rap. la t. brut. | rap. la m. c. | rap. la t. brut | rap. la m. c. | rap. la t. brut | rap. la m. c. | rap. la t. brut | rap, la m.c. | rap. la t. brut | rap. la m.c. |
| Poiana Stampei, nr. 2 . . . . . | 38,70 | 42,0 | 17,10 | 19,50 | 25,0 | 18,50 | 180,0 | 205,0 | 0,32 | — | 0,01 | — |
| Căţelele-Huedin, nr. 3 . . . . . | 37,00 | 39,8 | 14,70 | 17,50 | 34,0 | 24,9 | 125,0 | 149,0 | 0,28 | — | 0,08 | — |
| Miercurea-Ciuc nr. 4 | 43,30 | 47,50 | 16,30 | 21,44 | 26,30 | 14,0 | 120,0 | 158,0 | 0,32 | — | 0,09 | — |
| Mîndra-Făgăraș, nr. 2 . . . . . | 51,0 | 52,40 | 9,0 | 11,8 | 24,0 | 17,0 | 106,0 | 139,0 | 0,26 | — | 0,08 | — |
| Dersca Dorohoi, nr. 1 . . . . . | 51,00 | 47,0 | 12,50 | 16,65 | 24,60 | 16,85 | 93,0 | 124,0 | 0,30 | — | 0,05 | — |

*) La masa combustibilă a fost raportată doar apa pirogenetică.

*Tabloul nr. 3*

**Caracteristice chimico-tehnice ale semicocsurilor de turbă *)**

| Denumirea zăcămîntului | Umiditate % | Cenușă % | Cocs brut % | Cocs net % | | Materii volatile % | | Sulf total % | Azot % | $P_s$ kcal/kg | | $P_i$ kcal/kg | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | rap. la t. brut. | rap. la m. c. | rap. la t. brut | rap. la m. c. | | | rap. la t. brut | rap. la m. c. | rap. la t. brut | rap. la m. c. |
| Poiana Stampei, nr. 2 . . . . | — | 5,29 | 78,82 | 73,56 | 77,70 | 21,18 | 22,30 | 0,28 | 1,62 | 6 684 | 7 050 | 6 496 | 6 860 |
| Călăţele-Huedin, nr. 3. . . . . | — | 9,95 | 80,66 | 70,71 | 78,50 | 19,34 | 21,50 | 0,36 | 0,91 | 6 731 | 7 470 | 6 528 | 7 260 |
| Miercurea-Ciuc, nr. 4. . . . . | — | 16,5 | 80,47 | 63,88 | 76,50 | 19,53 | 23,50 | 0,66 | 1,14 | 5 216 | 6 250 | 5 046 | 6 050 |
| Mîndra-Făgăraș, nr. 2 . . . . | — | 23,0 | 80,54 | 57,49 | 74,75 | 19,46 | 25,25 | 1,48 | 1,06 | 5 204 | 6 770 | 5 049 | 6 550 |
| Dersca-Dorohoi, nr. 1 . . . . | — | 31,31 | 79,95 | 48,62 | 71,80 | 20,05 | 28,20 | 0,63 | 0,91 | 4 789 | 6 980 | 4 620 | 6 725 |

*) La coloanele unde nu este prevăzut la ce a fost raportată valoarea respectivă, înseamnă că s-a calculat numai la turba brută.

*Tabloul nr. 4*

**Analiza gazelor obținute la semicocsificarea turbelor *)**

| Denumirea zăcămîntului | $CO_2+H_2S$ % | $C_nH_{2n}$ % | $H_2$ % | CO % | $CH_4$ + omologi % | $N_2$ % | $P_s$ kcal/Nm³ | $P_i$ kcal/Nm³ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Poiana Stampei, nr. 2 . . . . . | 63,60 | 1,90 | 8,50 | 7,40 | 17,50 | 1,10 | 2 415 | 2 198 |
| Călățele-Huedin, nr. 3 . . . . . | 65,5 | 2,1 | 13,2 | 3,4 | 11,5 | 4,3 | 1 920 | 1 730 |
| Miercurea-Ciuc, nr. 4 . . . . . | 73,3 | 1,4 | 11,7 | 3,50 | 9,6 | 0,5 | 1 573 | 1 420 |
| Mîndra-Făgăraș, nr. 2 . . . . . | 69,7 | 1,7 | 10,5 | 5,2 | 11,2 | 1,7 | 1 804 | 1 616 |
| Dersca-Dorohoi, nr. 1 . . . . . | 77,10 | 2,60 | 6,00 | 5,40 | 8,30 | 0,60 | 1 502 | 1 382 |

*) Compoziția gazelor a fost calculată fără aer.

*Tabloul nr. 5*

**Cocsificarea turbelor — randamente**

| Denumirea zăcămîntului | Randament cocs % | | Randament gudron % | | Randament apă *) % | | Randament gaz m³/t | | Extras condensat din gaz (benzine) % | | Randament amoniac din gaz % | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | rap. la t. brut. | rap. la m. c. | rap. la t. brut. | rap. la m. c. | rap. la t. brut. | rap. la m. c. | rap. la t. brut. | rap. la m. c. | rap. la t. brut | rap. la m. c. | rap. la t. brut. | rap. la m. c. |
| Poiana Stampei, nr. 2 . . . . . | 33,5 | 36,4 | 9,30 | 10,6 | 23,45 | 14,2 | 420,60 | 488 | 0,18 | 0,206 | 0,13 | 0,15 |
| Călățele-Huedin, nr. 3 . . . . . | 30,85 | 32,6 | 6,4 | 7,64 | 28,00 | 17,8 | 380 | 454 | 0,53 | 0,63 | 0,16 | 0,19 |
| Miercurea-Ciuc, nr. 4 . . . . . | 33,00 | 33,55 | 6,8 | 8,97 | 24,3 | 11,4 | 314 | 413 | 0,75 | 0,98 | 0,14 | 0,18 |
| Mîndra-Făgăraș, nr. 2 . . . . . | 41,00 | 38,2 | 3,2 | 4,2 | 20,6 | 11,2 | 368 | 483,5 | 0,65 | 0,85 | 0,24 | 0,31 |
| Dersca-Dorohoi, nr. 1 . . . . . | 44,30 | 37,6 | 6,25 | 8,3 | 22,0 | 13,35 | 282,2 | 376 | 0,68 | 0,90 | 0,31 | 0,41 |

*) La masa combustibilă a fost raportată doar apa pirogenetică.

*Tabloul nr. 6*

**Caracteristicile chimico-tehnice ale cocsurilor de turbă *)**

| Denumirea zăcămîntului | Umiditate % | Cenușă % | Cocs brut % | Cocs net % | | Materii volatile % | | Sulf total % | Azot % | $P_s$ kcal/kg | | $P_i$ kcal/kg | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | rap. la t. brut. | rap. la m. c. | rap. la t. brut. | rap. la m. c. | | | rap. la t. brut | rap. la m. c. | rap. la t. brut | rap. la m. c. |
| Poiana Stampei, nr. 2 . . . . . | — | 6,06 | 98,85 | 92,80 | 98,80 | 1,15 | 1,20 | 0,39 | 0,49 | 6 820 | 7 270 | 6 740 | 7 180 |
| Călățele-Huedin nr. 3 . . . . . | — | 11,83 | 98,17 | 86,34 | 97,83 | 1,83 | 2,17 | 0,41 | 0,79 | 6 850 | 7 780 | 6 818 | 7 725 |
| Miercurea-Ciuc, nr. 4 . . . . . | — | 24,23 | 98,58 | 74,35 | 98,20 | 1,42 | 1,80 | 0,96 | 0,36 | 6 132 | 8 100 | 6 079 | 7 930 |
| Mîndra-Făgăraș, nr. 2 . . . . . | — | 28,90 | 99,28 | 70,38 | 99,05 | 0,72 | 0,95 | 1,79 | 0,56 | 5 380 | 7 575 | 5 284 | 7 325 |
| Dersca-Dorohoi, nr. 1 . . . . . | — | 39,1 | 93,18 | 53,45 | 95,65 | 2,35 | 4,35 | 0,70 | 0,22 | 4 422 | 7 950 | 4 356 | 7 800 |

*) La coloanele unde nu este prevăzut la ce a fost raportată valoarea respectivă, înseamnă că s-a calculat la turba brută.

*Tabloul nr. 7*

**Analiza gazelor obținute la cocsificarea turbelor *)**

| Denumirea zăcămîntului | $CO_2+H_2S$ % | $C_nH_{2n}$ % | $H_2$ % | CO % | $CH_4$ + omologi % | $N_2$ % | $P_s$ kcal/Nm³ | $P_i$ kcal/Nm³ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Poiana Stampei, nr. 2 . . . . . | 14,30 | 2,00 | 49,30 | 21,40 | 11,20 | 1,80 | 3 530 | 3147 |
| Călățele-Huedin nr. 3 . . . . . | 12,30 | 3,10 | 43,70 | 23,40 | 15,00 | 2,50 | 3 930 | 3 538 |
| Miercurea-Ciuc, nr. 4 . . . . . | 15,90 | 1,80 | 49,70 | 20,30 | 11,40 | 0,90 | 3 468 | 3 116 |
| Mîndra-Făgăraș, nr. 2 . . . . . | 11,70 | 2,10 | 50,90 | 17,30 | 16,10 | 1,90 | 3 933 | 3 516 |
| Dersca-Dorohoi nr. 1 . . . . . | 12,90 | 2,30 | 51,30 | 19,30 | 11,50 | 2,70 | 3 565 | 3 201 |

*) Compoziția gazelor a fost calculată fără aer.

Călăţele-Huedin şi foarte slabe pentru Miercurea-Ciuc (tabloul nr. 1). Prin rezistenţă bună se înţelege o brichetă de semicocs rezistentă din punct de vedere mecanic şi care să facă cît mai puţin praf la frecare între degete.

Brichetele semicocsificate prezintă o contracţie de volum faţă de brichetele crude, au o putere calorifică ridicată şi un procent de cenuşă acceptabil.

Datorită acestor considerente, precum şi a rezistenţei bune (în special la brichetele de Poiana Stampei), brichetele de semicocs constituie un bun combustibil, de importantă valoare energetică.

Randamentul ridicat în gaze de semicocsificare, după cum am văzut, pentru turba de Poiana Stampei, variază în limite mici pentru turbele de Miercurea-Ciuc, Călăţele-Huedin şi Mîndra-Făgăraş (139—158 $m^3/t$), iar la turba de Dersca-Dorohoi este şi mai mic (124 $m^3/t$).

Compoziţia gazului prin procentul ridicat de $CO_2$ arată că avem de-a face cu un combustibil tînăr şi că din punct de vedere economic, acest gaz neepurat intră în categoria gazelor sărace.

Puterea calorifică superioară a gazelor variază între 1500 şi 1900 $kcal/Nm^3$, pentru toate turbele indicate în tabloul nr. 4, în afară de cea de Poiana Stampei, al cărei gaz de semicocs are $P_s = 2400$ $kcal/Nm^3$.

## CONCLUZII PRIVIND COCSIFICAREA

Ca şi la semicocsificare se observă şi aici un randament ceva mai scăzut de cocs la turba Călăţele-Huedin (circa 32%), aceasta avînd în schimb un randament ridicat în gaz şi gudron.

Un randament crescut în gudron şi gaz se observă şi la turba de Poiana Stampei, unde gudronul atinge chiar valoarea de 10,6% (calculată la masa combustibilă), iar gazul atinge valoarea de 488 $m^3/t$ (tabloul nr. 5). Turbele de Mîndra-Făgăraş dau la cocsificare randamentul cel mai scăzut în gudron (circa 4,2 %).

Cocsul de turbă obţinut are şi el o oarecare tendinţă de aglomerare, avînd la ieşirea din tubul de cuarţ, forma unui bastonaş, care se rupe însă la o uşoară apăsare.

Cu foarte puţină cenuşă şi sulf, cocsurile de Călăţele-Huedin şi Poiana Stampei au o putere calorifică ridicată la materialul brut, de 6820—6850 kcal/kg, spre deosebire de celelalte care variază între 4400 kcal/kg. (Dersca-Dorohoi) şi 6130 kcal/kg (Miercurea-Ciuc) (tabloul nr. 6).

Randamentul în gaze de cocs scade, ca şi în cazul gazului de semicocsificare, de la turba de Poiana Stampei pînă la cea de Dersca-Dorohoi.

Compoziţia gazului este caracteristică pentru un gaz de cocs, cu o uşoară creştere a procentului de $CO_2$, datorită aceluiaşi fapt, ca şi la gazul de semicocsificare (turba : combustibil solid foarte tînăr). Datorită conţinutului mare de hidrogen şi metan, gazul poate fi considerat un gaz bogat. Puterea calorifică $P_s$ variază între 3500—3900 $kcal/Nm^3$ (tabloul nr. 7).

Brichetele de turbă cocsificate dau un cocs foarte rezistent, compact şi dur pentru Poiana Stampei.

Urmează apoi cel de Mîndra-Făgăraş şi Călăţele-Huedin, care nu sînt fărîmate şi prezintă o oarecare rezistenţă, satisfăcătoare. Bricheta de cocs din turba de Miercurea-Ciuc este crăpată pe toate direcţiile şi se scoate din retortă sub formă de bucăţele.

Aşadar, prin cocsificarea şi semicocsificarea brichetelor s-a constatat că se obţin rezultate bune doar parţial, pentru anumite turbe.

S-a observat că turba de Poiana Stampei, în special, se comportă mai bine din toate punctele de vedere la brichetare, rezistenţă, semicocsificare şi cocsificare, avînd totodată un procent redus de cenuşă.

*Tabloul nr. 8*

**Extracţii de ceruri şi răşini din turbe**

| Denumirea zăcămîntului | | Numărul probei *) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Poiana Stampei | Extras total % | 14,22 | 16,20 | 14,80 | 12,20 | 5,40 |
| | Extras rap. la m. c. % | 17,77 | 18,56 | 16,91 | 14,16 | 6,34 |
| Călăţele-Huedin | Extras total % | — | 3,19 | 9,98 | — | — |
| | Extras rap. la m. c. % | — | 5,65 | 11,9 | — | — |
| Miercurea-Ciuc | Extras total % | 3,50 | 3,50 | 3,71 | 4,17 | — |
| | Extras rap. la m. c. % | 4,55 | 4,48 | 4,89 | 5,48 | — |
| Mîndra-Făgăraş | Extras total % | 4,86 | 4,56 | 10,96 | 3,60 | — |
| | Extras rap. la m. c. % | 6,74 | 5,99 | 15,36 | 4,13 | — |
| Dersca-Dorohoi | Extras total % | 3,85 | 3,92 | 2,66 | 2,56 | — |
| | Extras rap. la m. c. % | 5,12 | 5,35 | 4,38 | 3,81 | — |

*) Cifrele arabe 1, 2, 3, 4 şi 5 se referă la numărul probei de turbă din zăcămîntul respectiv, după cum s-a specificat în nota I [1].

## EXTRACŢII DE CERURI ŞI RĂŞINI DIN TURBĂ

Aceste extracţii au fost făcute cu alcool : benzen în proporţie de 1 : 1 gravimetric, pentru o mai bună eficacitate a extracţiei. Extrasul cuprinzînd cerurile şi răşinile din turbă, după evaporarea solventului, a fost raportat la masa combustibilă.

S-a constatat şi aici că turba de Poiana Stampei s-a dovedit deosebită, dînd un procent de extras ce variază între 14—18 % în general, (excepţie face proba nr. 5, cu valoarea de 6,4% extras).

Un procent ceva mai mare faţă de restul turbelor îl prezintă şi turba de Călăţele-Huedin, iar pentru celelalte trei zăcăminte procentele de extras variază între 4 şi 6 %.

Mai este o excepţie cu proba nr. 3 de Mîndra-Făgăraş, probă de adîncime care dă 15 % extras.

Cerurile rezultate au proprietăţi asemănătoare cu ceara „montana" extrasă din cărbunii bruni şi pot servi pentru fabricarea cerei de parchet, izolanţi electrici, substanţe farmaceutice, impermeabilizarea fibrelor textile etc., iar răşinile la înclieirea hîrtiei.

Datele rezultate de pe urma acestor extracţii sînt cuprinse în tabloul nr. 8.

## CONCLUZII GENERALE

Din rezultatele analizelor, ale prelucrărilor chimico-tehnologice şi mecanice, la care au fost supuse atît turbele ca atare, cît şi brichetele de turbă, se constată următoarele :

1) Turbele, în general, reduse la procente mici de umiditate alcătuiesc un material cu putere calorifică ridicată, cenuşă în limite acceptabile (zăcămintele de Poiana Stampei şi Călăţele-Huedin au chiar un procent foarte mic de cenuşă) şi sulf puţin.

2) Se brichetează fără liant, rezultînd brichete bune, care se aprind uşor, ard în condiţii bune şi fără să se dezagrege, iar parţial s-a putut obţine şi o rezistenţă acceptabilă la apă. Aşadar, turba se prezintă ca un combustibil de valoare, în ceea ce priveşte utilizarea casnică.

3) Turba se poate semicocsifica, direct sau brichetată, obţinîndu-se în al doilea caz brichete de semicocs, care reprezintă un bun combustibil energetic (ne referim la turbele de Poiana Stampei şi în mai mică măsură la cele de Mîndra-Făgăraş şi Călăţele-Huedin, vezi p. 270 şi 274.

Gazele de semicocsificare, deşi aparţin categoriei gazelor sărace, pot servi ca sursă de căldură pentru procesul de semicocsificare, apoi sub formă de gaze arse, ca sursă de căldură la uscarea turbei în vederea brichetării.

4) De asemenea, turba se poate cocsifica direct, sau brichetată, rezultînd pentru aceleaşi turbe menţionate mai sus, brichete de cocs cu putere calorifică ridicată şi cu valoarea unui combustibil energetic industrial; de pildă, utilizat în furnale, fonta rezultată va avea o calitate bună, datorită procentului redus de sulf din cocsul de turbă.

5) O posibilitate de utilizare energetică a turbelor de calitate inferioară, adică cu conţinut ridicat de cenuşă, ar putea fi gazeificarea lor. Aceasta ar permite dezvoltarea unei industrii de valorificare a resurselor locale, ca substituent al lemnului sau al păcurii. Gazeificarea turbei poate fi aplicată în apropiere de locul de exploatare pentru turba brută uscată la aer, sau chiar la distanţe mari pentru turba brichetată. Utilizarea produselor secundare (gudron şi ape de pirogenare) poate micşora considerabil costul gazului.

Dat fiind unele procente mari de fier în cenuşă, de exemplu Miercurea-Ciuc şi Mîndra-Făgăraş, gazeificarea lor poate fi făcută în gazogene cu zgură lichidă, ceea ce ar permite şi o recuperare de fontă.

6) Este necesar a se încerca o exploatare mecanizată a zăcămintelor prin utilizarea maşinilor; se obţine astfel un randament crescut faţă de cel realizat în condiţiile actuale de exploatare manuală, iar felul maşinii întrebuinţate va fi dat de condiţiile specifice ale fiecărui zăcământ în parte.

7) Pentru a face însă o recomandare în sensul utilizării turbei, brichetată ca atare, sau sub formă de semicocs de brichete pentru unele turbe amintite la punctul 3), drept combustibil casnic, trebuie să ţinem seama că zăcămintele de turbă din R.P.R. sînt mici şi răspîndite în diferite regiuni ale ţării.

Trebuie să mai ţinem seama că pentru construirea unei instalaţii de brichetare, cu toate agregatele necesare acestei operaţii complexe, urmează să se ia în consideraţie numai o exploatare care să corespundă în primul rînd unei capacităţi minimale de prelucrare anuală, precum şi unor rezerve de zăcămînt, care să asigure producţia pe un număr de ani suficient pentru amortizarea instalaţiilor.

Acest lucru este pe deplin posibil în Uniunea Sovietică, unde imensele întinderi locale ale zăcămintelor de turbă şi rezervele totale fac ca aceasta să intre în bilanţul energetic cu un procent însemnat (10—12%).

Faţă însă de răspîndirea zăcămintelor noastre şi de rezervele de turbă reduse pe zăcăminte, credem că această probemă trebuie studiată cu atenţie din punct de vedere economic.

8) Se impune aşadar ca în afara cantităţilor de turbă folosite în oarecare măsură drept combustibil local, pentru care se poate face brichetarea şi cu o presă de producţie industrială, să se pună accentul, de preferinţă, pe o altă direcţie de utilizare a turbelor, ţinînd seama de calităţile pe care le posedă unele dintre ele şi pe care le-am pomenit la locul cuvenit.

De exemplu pentru extracţii de ceruri şi răşini pot fi folosite turbele de Poiana Stampei şi Călăţele-Huedin; în scopuri terapeutice turbele de Poiana Stampei, Borsec, probabil şi Dersca; la fabricarea de materiale izolante pot fi utilizate turbele cu un grad de turbificare mai scăzut, ca de pildă, anumite părţi din turba de Poiana Stampei şi Călăţele-Huedin. Turba poate fi de asemenea folosită pentru diferite necesităţi agricole ca: aşternut pentru vite, culturi agricole, îngrăşămînt ş.a.m.d.

Utilizarea turbei ca îngrăşămînt se datoreşte nu numai substanţelor organice în descompunere, ci şi prezenţei sărurilor minerale. Menţionăm în special procentele ridicate de potasiu din turbele de la Mîndra-Făgăraş cu circa 4,1 % şi Călăţele-Huedin cu un procent de 3,5—3,9 % potasiu.

## ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОРФОВ РНР

### Сообщение II

### МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ТОРФЕ РНР

### (КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

**Настоящее сообщение является продолжением сообщения I из „Химико-технологического исследования торфа в РНР“ и содержит механическую обработку и химико-технологические процессы, примененные на торфе в виду установления путей их использования.**

Были исследованы: брикетирование, полукоксование, коксование и экстракция воска и древесной смолы для проб торфа из 5 существующих торфоразработок, и установлен ряд экспериментальных данных, конкретизированных в таблицах и диаграммах.

На основании результатов были сделаны интересные констатации и намечены линии обработки и химико-технологического и энергетического использования торфов в РНР.

### ОБЪЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

Изменения сопротивления разрыву в зависимости от влажности торфа.

## ÉTUDE CHIMIQUE ET TECHNOLOGIQUE DES TOURBES DE LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE ROUMAINE

NOTE II

### USINAGE MÉCANIQUE ET PROCESSUS CHIMICO-TECHNOLOGIQUES AUXQUELS SONT SOUMISES LES TOURBES DE LA R. P. R.

(RÉSUMÉ)

Suite de la première Note [1] de l'„Étude chimique et technologique des tourbes de la République Populaire Roumaine", cette Note expose les différents procédés d'usinage mécanique et les processus chimico-technologiques auxquels ces tourbes sont soumises en vue d'établir les meilleurs moyens de les mettre en valeur.

On a étudié le briquetage, la semi-cokéfaction, la cokéfaction et l'extraction de cires et de résines, sur des échantillons de tourbe provenant des cinq exploitations actuelles ; on a établi toute une série de données expérimentales, concrétisées sur des diagrammes et des tableaux.

Les résultats obtenus ont permis des constatations intéressantes et c'est en vertu de ces résultats que l'on a établi un projet possible d'usinage et d'utilisation chimico-technologique et énergétique des tourbes de la République Populaire Roumaine.

### EXPLICATION DES FIGURES

Variation de la résistance à la rupture, en fonction de l'humidité de la tourbe.

### BIBLIOGRAFIE

1. I. Blum şi colaboratori, *Studiul chimic şi tehnologic al turbelor din R.P.R. Nota I. Studiul caracteristicilor chimico-tehnice şi al gradului de turbificare.* Studii şi cercetări de energetică, 1956, nr. 1—2, p. 67.
2. I. Blum, *Die Rolle der Huminsäuren bei der Brikettierung brikeierfähiger Braunkohlen.* Braunkohle, 1931, nr. 38 şi 39, p. 837—840 şi 853—860.
3. B. D. Matveev, *K teorii briketiorobaniia torfa.* Torfianaia promîşlenosti, 1951, nr. 5
4. Brădeţeanu, *Aspecte noi în brichetarea cărbunilor.* Revista minelor, Ed. tehnică, Bucureşti, 1951, nr. 4.
5. L. Formanek, *Noul procedeu de la Dolni Rychnov, de brichetare fără liant a cărbunilor bruni şi de piatră.* Revista Bansky Obzor, 1949, nr. 8.

6. B. M. Zlobinski, *Utilizarea brichetelor de turbă drept combustibil pentru furnale.* Torfianaia promîşlennosti 1949, nr. 7.
7. N. N. Bogdanov, *Polukoksovanie i gazifikaţia torfa.* Gosenergoizdat, Moscova-Leningrad, 1947.
8. A. A. Agroskin şi N. P. Cijevski, *Koksovanie.* Metalurghizdat, 1948, p. 340—363.
9. Fr. Schuster, *Laboratoriumsbuch für Gaswerke und Gasbetriebe aller Art.* W. Knapp, Halle (Saale), 1949, vol. I, p. 58, 157.
10. * * * *Fuel Research. Methods of Analysis of Coal and Coke Stationery.* Office, 1940, p. 62.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 3, 1956

*ELECTROENERGETICĂ ŞI ELECTROTEHNICĂ*

# SISTEMUL DE MĂSURI CA PARTE INTEGRANTĂ DIN SISTEMUL DE MĂRIMI *)

DE

PLAUŢIUS ANDRONESCU

## Introducere

Cînd, în cercetarea unui fenomen, s-a ajuns să se introducă anumite principii şi să se creeze anumite ipoteze, înseamnă că terenul cercetării fenomenului a devenit prielnic la stabilirea anumitor mărimi grupate în una sau mai multe legături funcţionale între ele ; se creează ceea ce numim un *sistem de mărimi* cu ajutorul căruia evidenţiem în spaţiu şi în timp *variaţia stării sistemului în concordanţă cu evoluţia fenomenului.*

Legăturile funcţionale dintre mărimi se reprezintă în general prin *ecuaţii diferenţiale*, ceea ce înseamnă că uneltele matematice sînt acelea care creează *logica necesară* şi care permit să se producă *raţionamente* cît mai adecvate cercetării fenomenului.

Mărimile pot fi de natură scalară sau vectorială, ele îndeplinind în sistemul de mărimi rolul de *mărimi naturale* sau *mărimi de calcul.*

Cu cît numărul mărimilor din ecuaţiile fundamentale este mai mare ca acela al ecuaţiilor, cu atît numărul unităţilor stabilite arbitrar va fi mai mare.

Unităţile fixate arbitrar, denumite *unităţi fundamentale*, sînt supuse condiţiei ca ele să poată fi reproduse ori unde şi oricînd în mod exact.

Unităţile celorlalte mărimi depind atît de cele fundamentale, cît şi de ecuaţiile date.

Stabilirea mărimilor şi a ecuaţiilor de legătură dintre ele, şi, mai ales, reuşita determinării unităţilor mărimilor din sistem pe cale experimentală reprezintă *criteriul de apreciere a evoluţiei fenomenului şi a variaţiei, în spaţiu şi în timp, a stării sistemului de mărimi stabilit.*

*O dată cu stabilirea sistemului de mărimi şi a unităţilor fixate arbitrar, s-a creat în mod implicit şi sistemul de măsuri cu unităţile şi dimensiunile mărimilor.*

---

*) Lucrare prezentată Institutului de energetică la data de 25 martie 1952.

### Considerații fundamentale

Datorită faptului că atribuim spațiului două însușiri distincte, de a se electriza și de a se magnetiza, evidențiate prin constanta dielectrică $\varepsilon_0$ și prin permeabilitatea magnetică $\mu_0$, nu sîntem încă în situația de a obține din cercetarea fenomenului electromagnetic rezultatul dorit de a folosi *un sistem de mărimi unitar*.

S-a cercetat o extremă a fenomenului electromagnetic și anume *fenomenul electrostatic* evidențiat prin aceea că energia electrică înmagazinată în spațiul electrizat devine constantă în raport cu timpul.

S-a cercetat apoi cealaltă extremă, *fenomenul magnetostatic*, cînd energia magnetică înmagazinată în spațiul magnetizat devine constantă în raport cu timpul.

După aceea, datorită ecuațiilor lui Maxwell, s-a putut trece propriu zis la cercetarea *fenomenului electromagnetic*, în care are loc o propagare de energie prin spațiul electromagnetizat.

Datorită faptului că cele două fenomene de la început au fost cercetate în mod independent unul față de celălalt, s-au creat două sisteme de mărimi : unul cu mărimi zise electrice și mecanice, iar celălalt cu mărimi zise magnetice și mecanice.

Fiecare din cele două sisteme conțin în mod implicit cîte un sistem de măsuri cu unitățile și dimensiunile aferente lor, din moment ce s-au stabilit pentru fiecare din ele unitățile fundamentale.

Prin folosirea celor două legi ale lui Maxwell în cadrul cercetării fenomenului electromagnetic, apar legături funcționale între mărimile electrice și cele magnetice. S-a creat un *al treilea sistem de mărimi*, în care una din mărimi trebuie să apară ca o *constantă*, cu o astfel de unitate și dimensiune încît cei doi termeni ai egalității în care figurează mărimile electrice și cele magnetice să aibă aceleași valori numerice și aceleași dimensiuni.

Constanta o însemnăm prin „$c$" și poartă denumirea de *constantă universală* și tocmai pentru faptul că ea a putut fi determinată experimental s-au putut folosi legile lui Maxwell.

Un caz asemănător îl întîlnim la cercetarea fenomenelor mecanice și termice. Pentru fiecare din ele s-a creat cîte un sistem de mărimi cu sisteme de măsuri corespunzătoare.

Datorită propagării energiei calorice și a transformării ei în lucru mecanic sau vice-versa, s-a creat *principiul I al termodinamicii*, concretizat printr-o ecuație în care apare legătura între mărimile mecanice și cele termice.

Mărimea cea nouă pe care o conține această ecuație este tocmai constanta $J$, denumită echivalent mecanic, care fiind determinată experimental a permis aplicarea principiului I al termodinamicii.

### Sistemele de mărimi

În cadrul cercetării *fenomenului mecanic* apar trei ecuații fundamentale independente între ele, cu 6 mărimi (tabloul nr. 1).

Cu fiecare ecuație pe care am introduce-o în sistem, apare cîte o mărime nouă în plus, astfel că numărul acelor mărimi ale căror unități le fixăm arbitrar rămîne neschimbat.

Ca urmare a fost necesar să se fixeze în cazul de față în mod arbitrar trei unități.

Într-adevăr s-au fixat în mod arbitrar cm, g și s, cu simbolurile pentru dimensiuni [L], [M] și [T].

Senzația pe care o avem despre lungime, ne-a condus ușor la fixarea în mod arbitrar a unității acesteia.

Datorită rotației pământului în jurul axei sale și a mișcării pământului în jurul soarelui s-a creat senzația de periodicitate și, ca atare s-a putut stabili *o anumită mișcare uniform circulară*, care poate fi reprodusă oriunde și oricînd, în mod exact, cu scopul ca prin intermediul ei să putem compara orice altă mișcare în spațiu ; spunem atunci că urmărim o mișcare oarecare în timp.

Fenomenul gravitației permite să putem determina masa oricărui corp din moment ce unitatea ei a fost stabilită arbitrar. Cînd balanța este în echilibru vom spune că la forțe egale, accelerația gravitației fiind constantă, rezultă mase egale.

Așadar, prin fixarea celor trei unități în mod arbitrar, s-a creat sistemul de măsuri, CGS (cm, g, s).

Unitățile celorlalte mărimi din sistemul de mărimi din tabloul nr. 1 depind atît de cele 3 unități fixate arbitrar, cît și de felul cum se prezintă legăturile între mărimi în cadrul sistemului.

În cazul cercetării fenomenului electromagnetic, după cum s-a văzut, apar *3 sisteme de mărimi.*

Cît timp fenomenul electromagnetic se prezintă sub forma de *fenomen electrostatic*, ne folosim de sistemul de mărimi din tabloul nr. 2, care conține 6 relații fundamentale independente între ele, cu 10 mărimi electrice și mecanice (tabloul nr. 2).

Unitățile fundamentale fixate arbitrar sînt

$$\text{cm},\ \text{g},\ \text{s}, \varepsilon_0 = 1[\varepsilon], \tag{1}$$

cu simbolurile pentru dimensiuni

$$[\text{L}],\ [\text{M}],\ [\text{T}] \text{ și } [\varepsilon]. \tag{1'}$$

O dată cu fixarea unităților fundamentale, se obține un *sistem de măsuri electric* coerent cu 4 unități fundamentale și 4 dimensiuni.

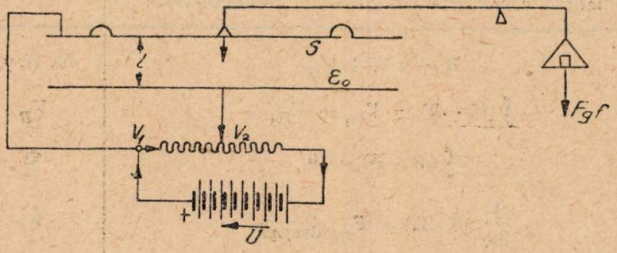



Fig. 1. — Balanța Thomson

Cu ajutorul *balanței Thomson* se determină experimental pentru prima dată unitatea diferenței de potențial $V_1 - V_2$ (fig. 1).

*Tabloul nr. 1*

| Numărul minim de ecuații fundamentale pentru cercetarea fenomenului mecanic | Mărimile |
|---|---|
| $\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{I}}{dt}$ | $\mathbf{F}$, $\mathbf{I}$ |
| $\mathbf{I} = m\mathbf{v}$ | $m\mathbf{v}$ |
| $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{l}}{dt}$ | $t$, $\mathbf{l}$ |

*Tabloul nr. 2*

| Numărul minim de ecuații fundamentale pentru cercetarea fenomenului electrostatic | Mărimile |
|---|---|
| $\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E}$ | $\mathbf{D}$, $\mathbf{E}$, $\varepsilon$ |
| $\int (d\mathbf{l} \cdot \mathbf{E}) = V_1 - V_2$ | $V$ |
| $\int (d\mathbf{s} \cdot \mathbf{D}) = 4\pi Q$ | $Q$ |
| $\frac{1}{8\pi} (\mathbf{D} \cdot \mathbf{E}) = F_{se}$ dyn/cm$^2$ | |
| $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ | $m$, $\mathbf{a}$ |
| $\mathbf{a} = \frac{d^2\mathbf{l}}{dt^2}$ | $\mathbf{l}$, $t$ |

*Tabolul nr. 3*

| Numărul minim de ecuații fundamentale pentru cercetarea fenomenului magnetostatic | Mărimile |
|---|---|
| $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} + \mathbf{M}_0$ | $\mathbf{B}$, $\mathbf{H}$, $\mu$ |
| $\int (\mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}) = V_{\mathbf{H}_1} - V_{\mathbf{H}_2}$ | $V_H$ |
| $\int (d\mathbf{s} \cdot \mathbf{B}) = \Phi$ | $\Phi$ |
| $\frac{1}{8\pi} (\mathbf{B} \cdot \mathbf{H}) = \mathbf{F}_{sm}$ dyn/cm$^2$ | $\mathbf{F}$ |
| $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ | $m$, $\mathbf{a}$ |
| $\mathbf{a} = \frac{d^2\mathbf{l}}{dt^2}$ | $\mathbf{l}$, $t$ |

În acest scop ne folosim de relația

$$\frac{1}{8\pi}\frac{(V_1 - V_2)^2}{l^2}\varepsilon_0 S = (F_{gf} \cdot 981)_{dyn} \tag{2}$$

(forța $F_{gf}$ poate fi cunoscută exact).

Se obține așadar pe cale experimentală diferența de potențial $V_1 - V_2$ ținîndu-se seama de cele 4 unități fixate arbitrar.

Din relația

$$Q_e = 4\pi \frac{V_1 - V_2}{l} \varepsilon_0 S \tag{3}$$

se deduce prin calcul sarcina electrică $Q_e$.

Descărcînd condensatorul din balanța Thomson peste un voltametru, de exemplu cu o soluție de nitrat de argint, se obține

$$m_{gAg} = \zeta_e Q_e, \tag{4}$$

din care se deduce $\zeta_e$ pentrucă $m_{gAg}$ se poate măsura.

Simbolul pentru dimensionarea mărimilor electrice apare în forma

$$[\, L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} \varepsilon^{\delta} \,].$$

Simbolul $[\varepsilon]$ evidențiază caracterul electric al mărimii.

Trecem la cazul cînd fenomenul electromagnetic se prezintă ca un *enomen magnetostatic produs de un magnet permanent.*

Sistemul de mărimi conține 6 ecuații cu 10 mărimi magnetice și mecanice (tabloul nr. 3).

Apar 4 unități fundamentale fixate arbitrar

$$\text{cm},\ \text{g},\ \text{s},\ \mu_0 = 1[\mu], \tag{5}$$

cu simbolurile pentru dimensiuni

$$[\text{L}],\ [\text{M}],\ [\text{T}] \text{ și } [\mu]. \tag{5'}$$

Se obține un sistem de măsuri magnetice coerent cu 4 unități fundamentale și 4 dimensiuni.

Simbolul mărimii magnetice apare în forma $[L^{\alpha'} M^{\beta'} T^{\gamma'} \mu^{\delta'}]$.

Prin simbolul $[\mu]$ se evidențiază caracterul magnetic al mărimii.

Cu un astfel de sistem de mărimi se poate cerceta și starea magnetică produsă în spațiu prin mișcarea electronilor cu o viteză constantă în spațiul ocupat de un fir metalic. Este cazul unui curent electric continuu.

Folosim în acest scop *electrodinamometrul absolut* pentru determinarea experimentală pentru prima dată a unității curentului electric în cadrul sistemului de măsuri magnetice (fig. 2).

Din relația

$$4\pi i_m^2 \frac{W}{l} \mu_0 S = (\overline{OA} \cdot F_{gf} \cdot 981)_{dyn/cm}, \tag{6}$$

și, ținîndu-se seama de cele 4 unități fixate arbitrar, se deduce prin măsurarea forței $F_{gf}$ curentul electric $i_m$.

Lăsînd să treacă curentul electric $i_m$ prin voltametru timp de $t_s$, se obține

$$m_{gAg} = \zeta_m i_m t = \zeta_m Q_m . \tag{7}$$

Dat fiind că pentru o cantitate de argint depusă la catod nu se poate obține decît o anumită sarcină, fie că ea este măsurată cu primul sau cu al doilea sistem de măsuri, vom avea

$$\zeta_e Q_e = \zeta_m Q_m ,$$

de unde deducem

$$\frac{Q_e}{Q_m} = \frac{\zeta_m}{\zeta_e} = \text{„}c\text{”}. \tag{8}$$

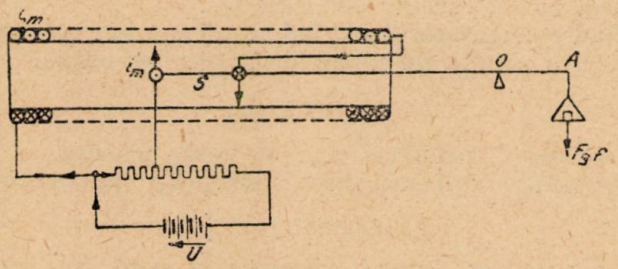



Fig. 2. — Electrodinamometrul absolut.

Prin existența constantei universale „$c$” se constată că unitățile sarcinii electrice în cadrul celor două sisteme de mărimi, sînt diferite.

Constanta „$c$” apare în forma

$$\text{„}c\text{”} = c_z \, [\mathrm{L\,T^{-1}}\, \varepsilon^{\frac{1}{2}}\, \mu^{\frac{1}{2}}], \tag{9}$$

a cărei valoare numerică $c_z$ se *determină experimental* și este $2{,}9971.10^{10}$ iar din expresia dimensiunii, după cum vedem, apar simbolurile $[\varepsilon]$ $[\mu]$.

*O altă metodă experimentală pentru determinarea lui „c” este următoarea* :

Se pot confecționa $n$ rezistențe, perfect egale între ele, și cu ajutorul punții Wheateston se poate verifica că sînt egale fără ca să fie necesară cunoașterea valorii numerice a acestora.

Prin descărcarea condensatorului de la balanța Thomson peste aceste rezistențe conectate în serie (este necesar să avem o rezistență totală cît mai mare) se determină valoarea numerică a uneia din rezistențe în cadrul sistemului de măsuri electrice.

Avem

$$nr_e = \frac{t_s}{C_e \, l_n \frac{Q_{e1}}{Q_{e2}}}, \tag{10}$$

în care raportul $\frac{Q_{e1}}{Q_{e2}}$ este determinat cu ajutorul unui galvanometru balistic neetalonat. Capacitatea $C_e$ este calculată.

Din (10) se obține rezistența electrică $r_e$ măsurată în sistemul electric.

Lăsînd să treacă curentul electric $i_m$, măsurat cu electrodinamometrul absolut, prin rezistența electrică $r_e$ (se recomandă o rezistență mică) și măsurînd diferența de potențial cu balanța Thomson, obținem

$$r^* = \frac{(V_1 - V_2)_e}{i_m} = \frac{(V_1 - V_2)_e}{\frac{i_e}{,,c''}} = r_e \,,,c'' \tag{11}$$

astfel încît

$$,,c'' = \frac{r^*}{r_e} \tag{12}$$

poate fi determinat experimental prin măsurarea lui $r^*$ respectiv $r_e$.

Metoda aceasta a doua este mai exactă decît prima în care tensiunea de polarizare a voltametrului influențează puțin descărcarea condensatorului de la balanța Thomson.

În cadrul cercetării *fenomenului electromagnetic* ne folosim de un nou sistem de mărimi cu 4 ecuații independente între ele cu 4 mărimi noi (tabloul nr. 4).

Cele 4 unități ale mărimilor noi sînt determinate cu ajutorul celor 4 ecuații date, ținîndu-se seama de cele două sisteme de măsuri stabilite anterior: sistemul electric și sistemul magnetic.

După cum vedem, *constanta universală „c" apare în formule în mod explicit*; ca urmare și ecuația (6) devine

$$4\pi\left(\frac{i_e}{,,c''}\right)^2 \frac{w}{l}\,\mu_0 S = (\overline{OA}\,F_{gf}\,981)_{\text{dyn}\,\cdot\,\text{cm}}\,. \tag{13}$$

Din cele de mai sus rezultă că în cercetarea fenomenului electromagnetic ne vom folosi de următoarele unități fundamentale fixate în mod arbitrar:

$$\text{cm, g, s, } \varepsilon_0 = 1\ [\varepsilon],\ \mu_0 = 1\ [\mu], \tag{14}$$

cu dimensiunile aferente

$$[\text{L}],\ [\text{M}],\ [\text{T}],\ [\varepsilon] \text{ și } [\mu], \tag{14'}$$

care poate fi denumit sistemul de măsuri *electric-magnetic*.

Acest sistem rezultă din contopirea celor două sisteme de mai sus. Ori de cîte ori apar legături între mărimile electrice și cele magnetice, constanta universală „c" apare explicit în formule.

Se constată că în expresiile dimensiunilor mărimilor electrice apare simbolul $[\varepsilon]$ și în expresiile dimensiunilor mărimilor magnetice simbolul $[\mu]$.

Reprezentarea dimensiunilor mărimilor electrice și magnetice prin simbolurile de mai sus scoate în evidență caracterul lor într-un mod cît mai corect.

*Sistemul de măsuri electric-magnetic este un sistem de măsuri coerent cu 5 unități fundamentale și 5 dimensiuni.*

*Tabloul nr. 4*

| Numărul minim de ecuaţii fundamentale pentru cercetarea fenomenului electromagnetic | Mărimile |
|---|---|
| $\mathbf{j} = \lambda \mathbf{E}$ | $\mathbf{j}, \lambda$ |
| $\int (d\mathbf{s} \cdot \mathbf{j}) = \dfrac{\partial Q}{\partial t} = i$ | $i$ |
| „$c$" $\int (d\mathbf{l} \cdot \mathbf{H}) = 4\pi i$ | „$c$" |
| „$c$" $\int (d\mathbf{l} \cdot \mathbf{E}) = -\dfrac{\partial \Phi}{\partial t}$ | „$c$" |

*Tabloul nr. 5*

| Numărul minim de ecuaţii fundamentale pentru cercetarea fenomenului termic | Mărimile |
|---|---|
| $Q_{\text{gcal}} = m_g \, C_{\text{gcal/g°C}} \, (\tau_2 - \tau_1)\,°\text{C}$ | $Q, c, \tau$ |
| $(po)_{\text{erg/g}} = R_{\text{erg/g°C}} \, T°\text{C}$ | $R$ |
| $\mathbf{P}_{\text{gcal/s . cm}^2} = -\lambda_{\text{gcal cm/s . cm}^2\,\text{C}} \nabla \tau_{°\text{C/cm}^2}$ | $\lambda$ |
| $\mathbf{F}_{\text{dyn}} = m_g \, \mathbf{a}_{\text{cm/s}^2}$ | $\mathbf{F}, m, \mathbf{a}$ |
| $\mathbf{a}_{\text{cm/s}^2} = \dfrac{d^2\mathbf{l}}{dt^2}$ | $\mathbf{l}, t$ |

*Tabloul nr. 6*

| Numărul minim de ecuaţii fundamentale folosite în fotometrie | Mărimile |
|---|---|
| $\Phi_{\text{lumen}} = I_{\text{HK}} \cdot \omega$ | $\Phi, I$ |
| $\Phi_{\text{lumen}} = E_{\text{lux}} \, Sm^2$ | $E$ |
| $\omega = \dfrac{S \cos \alpha}{\gamma^2}$ | $\omega$ |
| $S = l^2$ | $l$ |
| $e_{\text{lumen/m}^2} = mE$ | $l, m$ |
| $e_{\text{lumen/m}^2} = tE$ | $t$ |

### Primele concepții greșite întîlnite în literatură

În baza celor 4 ecuații fundamentale independente din tabloul nr. 4, se mai obține relația

$$v_{u0}^2 = \frac{,,c''^2}{\varepsilon_0 \mu_0}, \tag{15}$$

în care $v_u$ reprezintă viteza luminii în spațiul vid.

Viteza luminii se determină independent de felul cum s-au fixat unitățile pentru $\varepsilon_0$ și $\mu_0$.

Dacă, de exemplu, s-ar lua în mod arbitrar pentru spațiul vid $\varepsilon_0 = 3$ și $\mu_0 = 5$, atunci „$c$" ar lua o altă valoare numerică decît aceea pe care o are acum cu $\varepsilon_0 = 1$ și $\mu_0 = 1$.

Se constată că valoarea numerică cea nouă pe care ar lua-o „$c$" în cadrul sistemului de măsuri electric-magnetic ar satisface relația (15), fără ca valoarea numerică a lui $v_{u0}$ să se schimbe.

Faptul că $v_{u0}$ și „$c$" au azi aceleași valori numerice, cu toate că ele sînt mărimi diferite (au dimensiuni diferite), se datorește deci numai împrejurării că s-au luat în mod arbitrar $\varepsilon_0 = 1[\varepsilon]$ și $\mu_0 = 1\ [\mu]$.

Deoarece $v_{u0}$ și „$c$" au aceleași valori numerice, ele se confundă deseori una cu cealaltă, ceea ce este greșit.

„$c''^2$ nu poate fi considerată ca o prescurtare a expresiei $v_{u0}^2\ \varepsilon_0, \mu_0$, deoarece „$c$" există independent de faptul dacă are sau nu loc o undă electromagnetică.

„$c$" este legat numai de existența celor două sisteme de mărimi stabilite independent unul față de celălalt.

Dacă am introduce relația (15) în tabloul nr. 4, ar apărea o dată cu ea și o mărime nouă, viteza $v_{u0}$, astfel încît, crescînd cu una numărul ecuațiilor, crește totodată și numărul mărimilor, și deci *numărul unităților fixate arbitrar va rămîne tot 5.*

*Este necesar să se precizeze că nu* $\varepsilon_0$ *sau* $\mu_0$ *sînt determinate experimental, ci* $v_{u0}$ *și* „$c$".

### Sistemele de măsuri cînd „$c$" nu apare explicit în formule

Cînd „$c$" nu apare explicit în formule se deduce din relația (15)

$$\varepsilon_0' = \frac{\varepsilon_0}{,,c''^2} \quad \text{sau} \quad \mu_0' = \frac{\mu_0}{,,c''^2}, \tag{16}$$

astfel încît relația (15) poate lua una din formele

$$v_{\mu 0}^2 = \frac{1}{\varepsilon_0' \mu_0} \quad \text{sau} \quad v_{u0}^2 = \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0'}. \tag{17}$$

Mărimea $\varepsilon_0'$ nu trebuie confundată cu $\varepsilon_0$.

$\varepsilon_0'$ *reprezintă un raport* a cărei valoare numerică se stabilește prin unitățile mărimilor $v_{u0}$ și $\mu_0$.

Pe de altă parte, acest raport stabilește numai o legătură între unitățile mărimilor $\varepsilon_0$ și „$c$".

Ținîndu-se seama de reprezentarea

$$\varepsilon_0' = \frac{\varepsilon_0}{„c''^2} = \frac{\varepsilon_{0z}[\varepsilon]}{c_z^2\,[L^{+2}\,T^{-2}\,\varepsilon\mu]} = \frac{\varepsilon_{0z}}{„c''^2_z}\,[\varepsilon]\,\frac{1}{1\cdot[L^2\,T^{-2}\,\varepsilon\mu]}, \tag{18}$$

în care $\varepsilon_{0z}$, $c_z$ reprezintă valorile numerice (fără dimensiuni) ale mărimilor $\varepsilon_0$, „$c$'' constatăm că putem considera de exemplu

$$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_{0z}}{c_z^2}\,[\varepsilon], \tag{19}$$

$$„c''^2 = 1\cdot[L^2T^{-2}\,\varepsilon\mu]. \tag{19'}$$

Din moment ce $\varepsilon_0$ și „$c$'' apar exprimate în formulele (19) și (19'), s-a fixat arbitrar unitatea mărimii „$c$'' atît de mare încît ea să se cuprindă o singură dată în mărime.

Ca urmare, unitățile fundamentale devin acum

$$\text{cm, g, s, } \mu_0 = 1[\mu], \qquad „c'' = 1[L\,T^{-1}\,\varepsilon^{\frac{1}{2}}\,\mu^{\frac{1}{2}}].$$

Se constată că unitatea mărimii $\varepsilon_0$ s-a mărit considerabil, deoarece ea se cuprinde în mărimea $\varepsilon_0$ de $\frac{\varepsilon_{0z}}{c_z^2}$ ori, în care $\varepsilon_{0z} = 1$ și $c_z \cong 3\cdot 10^{10}$.

Pentru ca „$c$'' să nu apară explicit în formule, nu este suficient să considerăm numai valoarea numerică a lui „$c$'' egală cu unitatea, ci și dimensiunea acestei mărimi trebuie să o înglobăm spre exemplu în mărimile electrice.

Acesta este motivul pentru care în locul mărimii „$c$''$=1[LT^{-1}\,\varepsilon^{\frac{1}{2}}\,\mu^{\frac{1}{2}}]$ se folosește numai $\varepsilon_0'$, care are valoarea numerică a lui $\varepsilon_0$ și ca dimensiune, dimensiunea raportului $\frac{[\varepsilon]}{[L^2\,T^{-2}\,\varepsilon\mu]} = L^2\,T^2\mu^{-1}]$.

Ne folosim așadar de $\varepsilon_0'$, care nu mai posedă o dimensiune prin care să se evidențieze caracterul electric al ei și aceasta numai pentru a obține avantajul ca „$c$'' să nu mai apară explicit în formule.

În consecință, în locul *sistemului de măsuri coerent electric-magnetic*, cu unitățile fundamentale

$$\text{cm, g, s, } \varepsilon_0 = 1[\varepsilon], \qquad \mu_0 = 1[\mu]$$

și cu dimensiunile

$$[L],\ [M],\ [T],\ [\varepsilon],\ [\mu],$$

ne vom folosi de un nou sistem de măsuri, intitulat *sistemul de măsuri magnetic extins*, cu unitățile fundamentale

$$\text{cm, g, s, } \qquad \mu_0 = 1[\mu], \qquad „c'' = 1[LT^{-1}\,\varepsilon^{\frac{1}{2}}\,\mu^{\frac{1}{2}}] \tag{20}$$

și cu dimensiunile

$$[L],\ [M],\ [T],\ [\mu] \tag{20'}$$

folosit atunci cînd „$c$'' nu mai apare explicit în formule.

Noul sistem este incoerent pentru că posedă 5 unităţi fundamentale şi 4 simboluri pentru dimensiuni.

Întrucît constanta universală „$c$" este înglobată în mărimile electrice, rezultă că atît unităţile cît şi dimensiunile mărimilor electrice apar modificate într-o formă nepotrivită.

Atît la mărimile electrice, cît şi la cele magnetice dimensiunea va apare în forma

$$[L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} \mu^{\delta}].$$

Pentru mărimile electrice un astfel de simbol reprezintă pur şi simplu o deformare regretabilă.

De exemplu, curentul electric în *sistemul magnetic extins* va apare în forma

$$i_m = \frac{i_e}{„c"} = \frac{i_{ez}}{c_z} \frac{[i]}{[„c"]} = \frac{i_{ez}}{c_z} [i\, „c"^{-1}],$$

în care

$$c_z = 3 \cdot 10^{10}, \quad [i] = [L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2} \varepsilon^{\frac{1}{2}}], \quad [„c"] = [LT^{-1} \varepsilon^{\frac{1}{2}} \mu^{\frac{1}{2}}],$$

$$[i, „c"^{-1}] = [L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1} \mu^{-\frac{1}{2}}].$$

În mod analog se vor modifica unităţile şi dimensiunile mărimilor magnetice dacă „$c$" se înglobează în mărimile magnetice.

Din

$$\mu_0' = \frac{\mu_0}{„c"^2}$$

se poate obţine

$$\mu_0' = \frac{\mu_{0z}}{c_z} [\mu] \frac{1}{1[L^2 T^{-2} \varepsilon\mu]}, \tag{21}$$

în care

$$\mu_0 = \frac{\mu_{0z}}{c_z^2} [\mu], \tag{22}$$

$$„c"^2 = 1[L^2 T^{-2} \varepsilon\mu]. \tag{23}$$

Pentru ca „$c$", care are acum valoarea numerică egală cu unitatea, să dispară din formule, vom înglobă dimensiunea constantei „$c$" în dimensiunea lui $\mu_0$.

Cu alte cuvinte, în locul mărimilor $\mu_0$ şi

$$„c" = 1[LT^{-1} \varepsilon^{\frac{1}{2}} \mu^{\frac{1}{2}}]$$

ne vom folosi numai de $\mu_0'$, care ia aşadar aceeaşi valoare numerică nouă ca şi $\mu_0$, însă ca dimensiune va avea simbolul $[L^{-2} T^{-2} \varepsilon^{-1}]$.

Pentru ca „$c$" să nu apară explicit în formule, se modifică de data aceasta unităţile şi dimensiunile mărimilor magnetice.

Se obține un nou sistem de măsuri denumit *sistem de măsuri electric extins*, cu unitățile fundamentale

$$\text{cm, g. S,} \quad \varepsilon_0 = 1[\varepsilon], \quad \text{„}c\text{”} = 1[LT^{-1}\varepsilon^{\frac{1}{2}}\mu^{\frac{1}{2}}] \tag{24}$$

și cu dimensiunile

$$[L],\ [M],\ [T],\ [\varepsilon]. \tag{24'}$$

Acest sistem este deasemenea incoerent, pentru că atît mărimile electrice, cît și cele magnetice, apar dimensionate numai cu 4 simboluri în forma

$$[L^{\alpha'} M^{\beta'} T^{\gamma'} \varepsilon^{\delta'}].$$

Pentru ca „$c$” să nu apară explicit în formule, după cum vedem, se sacrifică fie forma justă a dimensiunii mărimii electrice, în cadrul *sistemului de măsuri magnetic extins*, fie forma justă a dimensiunii mărimii magnetice în cadrul *sistemului de măsuri electric-extins*.

Pentru a trece de la sistemul electric extins la sistemul magnetic extins, ne vom folosi de rapoartele

$$\frac{q_e}{q_m} = \frac{i_e}{i_m} = \frac{H_e}{H_m} = \text{„}c\text{”},$$

$$\frac{U_e}{U_m} = \frac{\Phi_e}{\Phi_m} = \frac{B_e}{B_m} = \frac{1}{\text{„}c\text{”}}.$$

În decursul cercetărilor s-a reușit cu multă greutate să se obțină primele două sisteme de mărimi, stabilite independent unul față de celălalt.

Cu toate acestea, nu s-ar fi putut atinge scopul final de a se putea trece la cercetarea fenomenului electromagnetic dacă nu ar fi existat legile lui Maxwell.

Ceea ce a putut duce la aplicarea acestor legi, este determinarea experimentală a constantei universale „$c$” pentru că numai cu ajutorul ei s-a putut stabili experimental interdependența între mărimile electrice — încadrate în primul sistem de mărimi — și mărimile magnetice — încadrate în cel de al doilea sistem de mărimi — interdependență ce apare în fenomenul electromagnetic.

Este adevărat că se remarcă o oarecare simplificare în calculul numeric cu mărimile electrice și magnetice atunci cînd „$c$” nu apare explicit în formule.

Pentru a atinge însă acest scop minor, s-a convenit cu destul regret, să se folosească mărimile electrice sau cele magnetice, după cum s-a văzut, cu simbolurile pentru dimensiuni destul de nepotrivite.

Este necesar să se atragă atenția în mod deosebit că acest fapt nu trebuie să ne conducă la *ignorarea completă a rolului ce-l îndeplinește mărimea „c”*.

Nu rareori se întîlnește azi în literatură absurditatea că, constanta dielectrică a spațiului vid determinată pe cale experimentală, are valoarea numerică de $0{,}886 \cdot 10^{-13}$ F/cm, în loc să se atragă atenția că această valoare

numerică se determină din

$$\varepsilon_0' = \frac{\varepsilon_0}{4\pi\,„c''^2}\,10^9 \qquad \text{F/cm},$$

şi anume atunci cînd $\varepsilon_0$ este fixat arbitrar egal cu unitatea iar „$c$" a fost determinat experimental.

În cele de mai sus s-a atras atenţia că se foloseşte mărimea $\varepsilon_0'$ în locul lui $\varepsilon_0$ şi „$c$" $= 1[c]$ în scopul ca mărimea „$c$" să dispară din formule.

### Cele trei sisteme de măsuri actuale

În sistemele actuale, $\varepsilon_0$, $\mu_0$ sînt considerate ca mărimi fără dimensiuni.

Ca urmare, *sistemul de măsuri electric-magnetic* se transformă numai din punct de vedere dimensional în sistemul Gauss [„$c$" apare explicit în formule].

*Sistemul de măsuri electric extins* se transformă numai din punct de vedere dimensional în sistemul electrostatic, iar *sistemul de măsuri magnetic extins* în sistemul electromagnetic.

Deosebirea între grupele de sisteme de mai sus se remarcă aşadar numai la simbolurile dimensiunilor mărimilor.

Atît în sistemul Gauss cît şi în sistemele electrostatic şi electromagnetic se folosesc numai simbolurile [L], [M], [T], pentru stabilirea dimensiunilor.

Aceste sisteme sînt incoerente, deoarece posedă 5 unităţi şi 3 simboluri pentru dimensiuni.

Pentru a se putea trece de la sistemul electrostatic, la sistemul electromagnetic, ne folosim de rapoartele

$$\frac{q_{elst}}{q_{elmagn}} = \frac{i_{elst}}{i_{elmagn}} = \frac{H_{elst}}{H_{elmagn}} = „c'' \qquad \frac{U_{elst}}{U_{elmagn}} = \frac{\Phi_{elst}}{\Phi_{elmagn}} = \frac{B_{elst}}{B_{elmagn}} = \frac{1}{„c''}.$$

De data aceasta „$c$" are dimensiunea unei viteze.

O vedere de ansamblu a sistemelor de măsuri menţionate mai sus o avem în tabloul nr. 7

Prima şi a doua coloană reprezintă formulele fundamentale cu dimensiunile mărimilor electrice şi magnetice în cadrul *sistemelor de măsuri electric extins*, respectiv *magnetic extins*.

În prima coloană, în partea de sus, apar numai formulele electrice care ne conduc la dimensiunile mărimilor electrice în cadrul *sistemului de măsuri electrice*.

În a doua coloană, în partea de jos, apar numai formulele magnetice, cu dimensiunile mărimilor magnetice încadrate în *sistemul de măsuri magnetic*.

Considerarea împreună a formulelor electrice din prima coloană cu formulele magnetice din a doua coloană ne conduce la *sistemul de măsuri electromagnetic*.

În coloana a treia apare *sistemul de măsuri Gauss*.

$\varepsilon$ şi $\mu$ fiind considerate ca mărimi fără dimensiuni, dimensiunile mărimilor electrice şi magnetice se deduc din dimensiunile mărimilor elec-

trice și magnetice ale sistemului de măsuri electric-magnetic, dacă se scot din expresiile dimensiunilor [ε], respectiv [μ].

În coloana a patra sînt prezentate dimensiunile mărimilor electrice și magnetice în cadrul *sistemului de măsuri electrostatic.*

Acestea se deduc din dimensiunile mărimilor din coloana întîia în întregime, prin scoaterea simbolului [ε] din expresiile dimensiunilor.

În sfîrșit, în coloana a cincia sînt prezentate dimensiunile mărimilor electrice și magnetice în cadrul *sistemului de măsuri electromagnetic*, deduse din coloana a doua, prin scoaterea simbolului [μ]. Prin introducerea unităților practice, m, kg, s, A, simbolurile de dimensiuni din tabloul nr. 7 nu se modifică.

Azi se propune să se folosească *sistemul de măsuri magnetic extins*, sub denumirea de *sistemul de măsuri Giorgi*, cu anumite unități fundamentale, denumite unități practice

$$\text{m, kg, s, A.} \tag{25}$$

Cu alte cuvinte se propune sistemul MKS extins.

### Sistemul de măsuri magnetice extins cu unitățile practice

În primul rînd se remarcă că acest sistem este incoerent.

El posedă aceleași unități fundamentale ca și sistemul electromagnetic, diferind de acesta, însă, numai sub aspectul dimensional.

Pentru introducerea unităților practice, ne folosim de relația

$$U_m i_m t_s = W_{erg} = m_g\, a_{cm/s^2}\, l_{cm}\,, \tag{26}$$

în care

$$W_{erg} = W_{joule} \cdot 10^{+7}_{erg/joule}\,. \tag{27}$$

Se fixează

$$\begin{gathered} U_m = U_p\, 10^{\alpha}, \qquad i_m = i_p\, 10^{\beta}, \qquad m_g = m_p\, 10^{\gamma}, \\ a_{cm/s} = a_{p/s^2}\, 10^{\delta}, \qquad l_{cm} = l_p\, 10^{\delta}. \end{gathered} \tag{28}$$

Prin introducerea relațiilor (28) în (26) se obține

$$\alpha + \beta = 7 = \gamma + 2\delta \tag{29}$$

(indicile $p$ evidențiază că mărimea este folosită cu unitatea practică).

*Primele două unități practice sînt secunda și joulul. Ca a treia unitate practică se propune amperul.*

În consecință se introduce

$$i_m = i_p\, 10^{-1}, \qquad \text{adică} \qquad \beta = -1.$$

Din relația (29) rezultă

$$\alpha = 8,$$

astfel încît *)

$$\left.\begin{aligned} i_m &= i_{elmagn} = i_{\text{amper}} \cdot 10^{-1}_{\text{unit. m/amper}}, \\ \Phi_m &= \Phi_{elmagn} = \Phi_{\text{maxwell}} = \Phi_{\text{weber}}\, 10^{8}_{\text{unit./weber}}, \\ U_m &= U_{elmagn} = U_{\text{volt}}\, 10^{8}_{\text{unit. m/volt}}, \\ L_m &= L_{elmagn} = L_{\text{henry}}\, 10^{9}_{\text{unit. m/henry}}. \end{aligned}\right\} \qquad (30)$$

*A patra unitate practică este metrul.*

Avem

$$l_{\text{cm}} = l_{\text{m}} \cdot 10^{2}_{\text{cm/m}},$$

adică

$$\delta = 2.$$

Din relația (29) rezultă

$$\gamma = 3,$$

astfel încît

$$m_g = m_{\text{kg}} \cdot 10^{3}_{\text{g/kg}}.$$

Determinarea mărimii $\mu_{0p}$

Ne folosim de relația

$$B_{\text{gauss}} = \mu_0 H_{\text{oersted}},$$

valabilă în cadrul sistemului de măsuri magnetice, respectiv în cadrul sistemului magnetic extins, sau în cadrul sistemului electromagnetic (dacă nu ținem seama de simbolul dimensiunii).

Ținîndu-se seama de

$$B_{\text{gauss}} = B_{\text{weber/m}^2} \frac{10^8}{10^4} = B_{\text{weber/m}^2}\, 10^4,$$

$$H_{\text{oersted}} = H_{\text{amper/m}} \frac{1}{10.10^2} = H_{\text{amper/m}} \cdot \frac{1}{10^3}, \qquad (31)$$

rezultă

$$B_{\text{weber/m}^2} = (\mu_0\, 10^{-7})_{\text{henry/m}} \cdot H_{\text{amper/m}}, \qquad (32)$$

de unde deducem

$$\mu_0 = (\mu_0\, 10^{-7})_{\text{henry/m}} = 10^{-7}\ _{\text{henry/m}} \text{ pentru } \mu_0 = 1.$$

Se remarcă că unitatea practică a intensității cîmpului magnetic se exprimă prin A/m, în loc de amperspire/m.

Determinarea mărimii $\varepsilon_{0p}$

Ne folosim de relația

$$\mathbf{D}_{elmagn} = \varepsilon_{0\ elmagn}\, \mathbf{E}_{elmagn},$$

*) Fiindcă $i_m$ și $i_{elmagn}$ au aceleași valori numerice, însă dimensiuni diferite, înseamnă că operația de introducere a mărimilor $i_{elmagn}$, $u_{elmagn}$, $\Phi_{elmagn}$, $L_{elmagn}$ în (30) nu mai este absolut exactă, atît timp cît nu se introduce în plus un simbol de dimensiune, pentru ca egalitatea să fie perfect valabilă.

în care

$$\varepsilon_{0\,elmagn} = \varepsilon_{0m} = \varepsilon'_{0p} = \frac{\varepsilon_0}{,,c''^2},$$

$$\mathbf{D}_{elmagn} = \mathbf{D}_{\text{coulomb/m}^2}\frac{1}{10.10^4} = \mathbf{D}_{\text{coulomb/m}^2}\cdot\frac{1}{10^5},$$

$$\mathbf{E}_{elmagn} = \mathbf{E}_{\text{volt/m}}\frac{10^8}{10^2} = \mathbf{E}_{\text{volt/m}}\ 10^6$$

de unde se deduce

$$\mathbf{D}_{\text{coulomb/m}^2} = (\varepsilon'_{0p})_{\text{farad/m}}\,\mathbf{E}_{\text{volt/m}}$$

sau

$$\mathbf{D}_{\text{coulomb/m}^2} = \left(\frac{\varepsilon_0}{,,c''^2}\,10^{11}\right)_{\text{farad/m}}\cdot\mathbf{E}_{\text{volt/m}} \tag{33}$$

în care

$$\varepsilon'_{0p} = \frac{\varepsilon_0}{,,c''^2}\,10^{11} = \frac{\varepsilon_{0z}}{c_{pz}^2 10^4}\cdot 10^{11}\,[\varepsilon]\,\frac{1}{1[\mathrm{L}^2\,\mathrm{T}^{-2}\,\varepsilon\,\mu]} = \frac{1}{9.10^9}\,[L^{-2}T^2\mu^{-1}], \tag{34}$$

unde s-a ținut seama că

$$\varepsilon_{0z} = 1\,;\ c_{pr} = 3.10^8 \text{ (în cadrul sistemului MKS).}$$

Introducîndu-se sistemul MKS în locul sistemului CGS, s-a găsit necesar să se dea o denumire unității forței.

S-a introdus denumirea de newton, astfel încît $10^5$ dyne corespunde forței de 1 newton.

Ori de cîte ori într-o formulă se folosesc unele mărimi exprimate cu unitățile firești ale sistemului electromagnetic sau magnetic extins, iar altele cu unitățile practice, va apare în formulă un factor numeric parazitar.

De exemplu în relația

$$d\mathbf{F}_{\text{dyn}} = \frac{i_{\text{amper}}}{10}\,[d\mathbf{l}_{\text{cm}}\,\mathbf{B}_{\text{gauss}}] \tag{35}$$

factorul $\frac{1}{10}$ este un factor parazitar.

Dacă exprimăm însă toate mărimile fie cu unitățile firești, fie cu unitățile practice, se obține

$$d\mathbf{F}_{\text{dyn}} = i_{elmagn}\,[d\mathbf{l}_{\text{cm}}\,\mathbf{B}_{\text{gauss}}], \tag{36}$$

$$d\mathbf{F}_{\text{newton}} = i_{\text{amper}}\,[d\mathbf{l}_m\,\mathbf{B}_{\text{weber/m}^2}], \tag{37}$$

deci dispare orice factor numeric parazitar după cum ne arată expresiile (36) și (37).

Practic va fi greu să se elimine complet factorul numeric parazitar; astfel de exemplu, este mai comod să exprimăm rezistența electrică specifică în forma $\rho_{\Omega\text{mm}^2/\text{m}}$, în loc de $\rho_{\Omega\text{m}^2/\text{m}}$.

Cu acest prilej se mai atrage atenția că este greșit să se scrie

$$1_{\text{joule}} = 10^7_{\text{erg}}$$

deoarece în orice egalitate atît în stînga, cît și în dreapta semnului egal, trebuie să avem aceeași valoare numerică și aceeași dimensiune.

Se recomandă să se spună

1 joule corespunde la $10^7$ erg și vom scrie 1 joule : $10^7$ erg.

Ca exemple de egalități prezentate într-o formă corectă sînt egalitățile (27), (31), (32).

Se mai recomandă ca pentru simbolurile dimensiunilor lungimii, masei și timpului să nu se folosească [cm], [g], [s]. Este recomandabil să se folosească pentru acestea simbolurile [L], [M], [T]; de exemplu simbolul [L] îl vom menține neschimbat, indiferent, dacă unitatea de lungime este 1 cm, 1 m, 1 km etc.

### Raționalizarea

O dată cu propunerea de a se introduce sistemul de măsuri MKS se mai propune să se introducă anumite relații raționalizate, ca de exemplu

$$\operatorname{div} \mathbf{D}^\star = \rho, \qquad (38)$$

$$\mathbf{D}^\star = \varepsilon^\star \mathbf{E},$$

în locul relațiilor obișnuite

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = 4\pi\rho, \qquad \mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E}, \qquad (39)$$

în care se consideră

$$\mathbf{D}^\star = \frac{\mathbf{D}}{4\pi}, \quad \varepsilon^\star = \frac{\varepsilon}{4\pi}. \qquad (40)$$

În cele ce urmează se va arăta că relațiile raționalizate (38) se găsesc în contradicție cu semnificația factorului $4\pi$.

De asemenea se va arăta că dacă este necesar să se introducă pentru clarificarea formulei specificarea de *raționalizată*, atunci relațiile (39) vor putea fi considerate, față de relațiile propuse, ca raționalizate.

Se relevă în primul rînd că *metoda de rezolvare* a ecuației diferențiale

$$-\nabla^2 V = \frac{4\pi}{\varepsilon_0}(\rho + \rho') \qquad (41)$$

nu este încă destul de cunoscută.

Se știe că, cu ajutorul formulei a doua a lui Green

$$(\nabla\{U\nabla V - V\Delta U\}) = U\nabla^2 V - V\nabla^2 U, \qquad (42)$$

se rezolvă ecuația diferențială (41), dacă funcția $U$, pe care o numim funcție ajutătoare, o exprimăm în forma

$$U = \frac{1}{r}. \qquad (43)$$

Ca urmare, se obține

$$d\mathbf{D} = do\ \rho\ \nabla\left(\frac{1}{r_1}\right) - ds\ \sigma\ \nabla\left(\frac{1}{r_2}\right), \tag{44}$$

în care $\rho$, $\sigma$ reprezintă densitatea voltmetrică și superficială a sarcinii electrice reale, iar $\mathbf{r}_1$ și $\mathbf{r}_2$ vectorii de poziție (fig. 3).

La determinarea integralei de suprafață $\int(\mathrm{ds}\mathbf{D})$, pentru suprafața închisă $S$ se obține

$$\iint(ds\ d\mathbf{D}) = \int_S (ds\mathbf{D}) = \int_{o_a} do\ \rho \int_S \left[-ds\ \nabla\left(\frac{1}{r_1}\right)\right] + \int_{s_a} ds\sigma \int_S \left[-ds\nabla\left(\frac{1}{r_2}\right)\right] =$$

$$= 4\pi\left\{\int_{o_a} do\rho + \int_{s_a} ds\sigma\right\} = 4\pi\left\{Q_{o_a} + Q_{s_a}\right\}. \tag{45}$$

Relația (45) ne arată că integrala de suprafață $\int(ds\mathbf{D})$ apare întotdeauna în formă de produs a două integrale, dintre care una este de forma

$$\int_S \left[-ds\ \nabla\left(\frac{1}{r}\right)\right] = 4\pi; \tag{46}$$

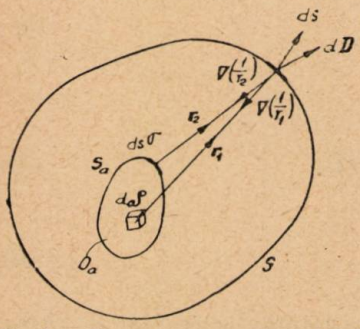


Fig. 3.— Reprezentarea vectorului $d\mathbf{D}$.

ca urmare, dacă ne referim la definiția divergenței unei funcții vectoriale (definiția divergenței unei funcții vectoriale este *integrala de suprafață a vectorului efectuată pentru acea suprafață închisă, care cuprinde în ea volumul egal cu unitatea*), rezultă că apariția factorului $4\pi$ în prima formulă din (39) corespunde întocmai noțiunii de divergență, unde s-a ținut seama de faptul că integrala se descompune într-un produs de doi factori dintre care unul este de forma

$$\int\left[-ds\ \nabla\left(\frac{1}{r}\right)\right],$$

și apoi de definiția factorului $4\pi$ din (46).

În literatură se mai întîlnește obiecțiunea că factorul $4\pi$ apare în mod greșit în expresia capacității unui condensator format din două plăci metalice paralele, în loc să apară în expresia capacității condensatorului format din două sfere metalice concentrice.

O astfel de obiecțiune nu prezintă nici o justificare științifică.

Tragem deci concluzia că nu se cunoaște încă metoda de determinare a capacității unui tub de forță.

În locul relației

$$\mathbf{D} = \varepsilon\,\mathbf{E},$$

care este valabilă în orice punct din spațiul electrizat din interiorul tubului de forță (fig. 4) se poate introduce relația

$$\Delta Q_1 = C_{12}\,(V_1 - V_2), \tag{47}$$

care leagă sarcina electrică $\Delta Q_1$ — de unde pornește tubul de forță — cu diferența de potențial $V_1 - V_2$ — corespunzătoare suprafețelor de unde pornește și unde se termină tubul de forță (fig. 4).

Pentru stabilirea relației (47) ne folosim de integrala

$$\int \frac{(d\mathbf{l}\mathbf{E})}{\int_{\Delta S}(d\mathbf{s}\mathbf{D})}\,. \tag{48}$$

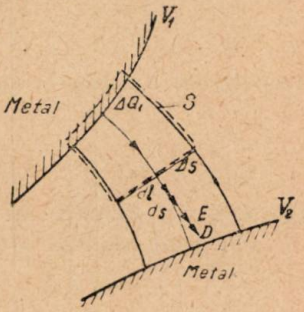



Fig. 4. — Tub de forță în cîmpul electric.

La efectuarea integralei (48) se constată că integrala de suprafață $\int (d\mathbf{s}.\,\mathbf{D})$ are pentru orice secțiune a tubului $\Delta S$ o valoare constantă.

După cum s-a văzut, se obține

$$\int_{\Delta S} (d\mathbf{s}\,\mathbf{D}) = \int_{S} (d\mathbf{s}\,\mathbf{D}) = 4\pi\Delta Q_1\,. \tag{49}$$

Ca urmare,

$$\int \frac{(d\mathbf{l}.\,\mathbf{E})}{\int_{\Delta S}(d\mathbf{s}\mathbf{D})} = \frac{1}{4\pi\Delta Q_1}\int (d\mathbf{l}\cdot\mathbf{E}) = \frac{V_1 - V_2}{4\pi\Delta Q_1}\,. \tag{50}$$

Pe de altă parte, admițînd că tubul de forță este luat cu o secțiune atît de mică încît $\mathbf{D}$ să poată fi considerat constant pentru orice punct de pe secțiunea $\Delta S$, se mai obține

$$\int \frac{(d\mathbf{l}\,\mathbf{E})}{\int_{\Delta_S}(d\mathbf{s}\mathbf{D})} = \int \frac{dl\,E}{\varepsilon E \int_{\Delta_S} dS} = \int \frac{dl}{\varepsilon \Delta S}\,. \tag{51}$$

Din (50) și (51) se deduce

$$\Delta Q_1 = \frac{1}{4\pi\int \frac{dl}{\varepsilon\Delta S}}\,(V_1 - V_2),$$

astfel încît

$$C_{12} = \frac{1}{4\pi\int \frac{dl}{\varepsilon\Delta S}}\,, \tag{52}$$

reprezintă capacitatea tubului de forță.

Relația (52) ne arată că factorul $4\pi$ nu are nici un fel de legătură cu forma condensatorului.

Factorul $4\pi$, după cum s-a văzut, apare la efectuarea integralei de suprafață a vectorului $\mathbf{D}$ : $\int (d\mathbf{s}\mathbf{D})$.

Ca urmare, factorul $4\pi$ apare în mod logic în expresia capacității condensatorului format din două plăci metalice paralele

$$C = \frac{\varepsilon \Delta S}{4\pi l}$$

și dispare în expresia capacității condensatorului sferic

$$C = \frac{r_1 r_2}{\varepsilon(r_2 - r_1)};$$

aceasta se datorește faptului că la efectuarea integralei pentru sferă

$$4\pi \int \frac{dl}{\varepsilon \Delta S} = \int \frac{dr}{\varepsilon r^2}$$

factorul $4\pi$ dispare în mod firesc.

În mod analog, apare factorul $4\pi$ și la efectuarea integralei de linie

$$\int (d\mathbf{l}\mathbf{H})$$

pentru o linie închisă de-a lungul liniei de forță în cîmpul magnetic.

### Sistemul de mărimi folosite la cercetarea fenomenului termic

În cazul sistemelor de mărimi s-a considerat mai întîi sistemul de mărimi folosite la cercetarea fenomenului mecanic, s-a trecut apoi la cele trei sisteme de mărimi folosite la cercetarea fenomenelor electrostatic, magnetostatic și eletromagnetic.

Trecem acum la sistemul de mărimi folosit la cercetarea *fenomenului termic.*

În tabloul nr. 5 sînt 5 relații fundamentale independente între ele cu 10 mărimi.

Ca urmare, s-au stabilit unitățile fundamentale

$$\text{cm, g, s, °C, } C_{\text{apă}} = 1 \text{ gcal/g °C}$$

fixate în mod arbitrar.

Datorită propagării energiei calorice și a transformării ei într-un lucru mecanic, sau viceversa, s-a creat *principiul I al termodinamicii,* care se sprijină pe principiul conservării energiei.

Apare deci o nouă relație cu o nouă mărime de formă

$$dQ = dW_i + \frac{1}{J} pdo. \tag{53}$$

Relația (53) joacă rolul legii inducției a lui Maxwell; $dW_i$ sub aspectul termic apare în forma

$$dW_i = C\,dT. \tag{54}$$

Mărimea cea nouă $J$, denumită *echivalentul mecanic,* joacă rolul constantei universale „$c$".

Numai cînd $J$ devine cunoscut, se poate stabili legătura între lucrul mecanic exprimat în ergi și energia calorică exprimată în grame calorii.

În cadrul unui proces adiabatic ($dQ = 0$) se obține experimental

$$J_{\text{joule/gcal}} = \frac{A\ 10^{-7}}{m \cdot C_{\text{apă}}(T_2 - T_1)} = 4{,}19_{\text{joule/gcal}}, \tag{55}$$

în care

$$A = \int p\,do.$$

Se mai poate considera și cazul cînd lucrul mecanic este nul, iar căldura este produsă prin efectul Joule-Lenz datorită unui curent electric continuu care curge într-o rezistență electrică.

În termodinamică, pe lîngă căldura specifică $C$, care reprezintă căldura specifică a gazului la *volum constant* cînd temperatura crește cu 1°C și gazul este în cantitate de 1 g, se mai introduce și căldura specifică la *presiune constantă* $C_p$.

Pentru stabilirea lui $C_p$ ne folosim de ecuația stării termice a gazului

$$po = RT \tag{56}$$

și de ecuația care evidențiază principiul I al termodinamicii (53)

$$dQ = C\,dT + \frac{1}{J}\,p\,do.$$

Deoarece se cere să se considere cazul $p = \text{const.}$, înseamnă că vom introduce ca variabile independente pe $T$ și $p$.

Vom înlocui așadar pe $do$ din relația (53), prin

$$do = \left[\frac{\partial o}{\partial T}\right]_p dT + \left[\frac{\partial o}{\partial p}\right]_T dp.$$

Ținîndu-se seama și de ecuația stării termice a gazului, rezultă

$$\left(\frac{\partial o}{\partial T}\right)_p = \frac{R}{P}, \quad \left(\frac{\partial o}{\partial p}\right)_T = -\frac{o}{p},$$

dat fiindcă avem

$$o + p\left(\frac{\partial o}{\partial p}\right)_T = 0.$$

Ca urmare se obține

$$dQ = \left(C + \frac{R}{J}\right) dT - \frac{1}{J}\,o\,dp, \tag{57}$$

iar pentru $p = \text{const.}$, relația (57) ia forma

$$dQ = \left(C + \frac{R}{J}\right) dT, \tag{58}$$

în care

$$C + \frac{R}{J} = C_p. \tag{59}$$

Relaţia (58) cuprinde o mărime nouă,

$$dQ = di = CdT.$$

Avem $$i = C_p\, T, \tag{60}$$

în care $i$ poartă denumirea de *entalpie.*

Robert Mayer a determinat experimental echivalentul mecanic $J$ prin măsurarea mărimilor $C$, $C_p$ şi constanta gazelor $R$.

Determinarea lui $J$ din relaţia (59) este echivalentă cu determinarea lui „$c$" din formula (15) atunci cînd se cunosc $V_{u_0}$, $\varepsilon_0$ şi $\mu_0$. Nimănui nu iar trece prin minte să considere pe $J$ ca o prescurtare a expresiei $\frac{R}{C_p - C}$ cînd se ştie că echivalentul mecanic a luat fiinţă datorită existenţei celor două sisteme de mărimi din tablourile nr. 1 şi 5 stabilite în mod independent unul faţă de celălalt.

Se poate pune şi aici condiţia ca $J$ să nu mai apară explicit în formule.

Într-un astfel de caz se obţine

$$R = C_p\, J - CJ = (C_p' - C')_{\text{erg/g°C}}, \tag{61}$$

$$Q'_{\text{erg}} = m\, C'\, (T_2 - T_1), \tag{62}$$

în care căldura specifică apare în forma

$$C' = (CJ)_{\text{erg/g°C}}. \tag{63}$$

Ca urmare, căldura necesară unui gram de apă la temperatura de 15°C pentru a-şi ridica temperatura cu 1°C va deveni

$$C'_{\text{apă}} = 4{,}19.10^7{}_{\text{erg/g°C}}. \tag{64}$$

*Valoarea aceasta pe care o obţine căldura specifică a apei nu ar fi fost cunoscută dacă nu ar fi existat posibilitatea ca $J$ să fie determinat experimental.*

*Este bine deci să se remarce că nu $C'_{\text{apă}}$ ci $J$ a fost determinat experimental, aşa după cum în cîmpul electromagnetic nu $\varepsilon_0$ şi $\mu_0$ ci „$c$" a fost determinat experimental.*

### Sistemul de mărimi folosite în fotometrie

Din tabloul nr. 6 rezultă 6 relaţii fundamentale cu 8 mărimi.

Ca urmare se fixează două unităţi în mod arbitrar.

Într-adevăr avem m şi 1 HK.

Unitatea intensităţii de lumină 1 HK este produsă de o lampă cu fitil şi cu combustibil format din acetat de amil ($C_7H_{14}O_2$) care produce o flacără de 40 mm înălţime şi 25 mm grosime şi este folosită după 10 minute de ardere.

Cît timp se poate aplica *optica geometrică* se foloseşte un con cu vîrful în sursa de lumină punctiformă şi format din raze de lumină ca în figura 5.

El evidenţiază propagarea undelor electromagnetice cu o astfel de lungime de undă, încît recepţionate de ochi ne dă senzaţia de lumină.

La baza cercetărilor propagării undelor luminoase, stă noţiunea vectorului lui Umov — Poynting

$$\mathbf{S} = \frac{„c"}{4\pi}\,[\mathbf{EH}]. \tag{65}$$

Vectorul **S** reprezintă energia electromagnetică care în unitatea de timp străbate unitatea de suprafață.

Dat fiind că în regiunea undei electromagnetice vectorii **E** și **H** sînt perpendiculari între ei și au aceleași valori numerice, rezultă că valoarea momentană a energiei electromagnetice care străbate unitatea de suprafață în unitatea de timp devine $\frac{„c“}{4\pi} E^2$.

Ca urmare, valoarea mijlocie în raport cu o perioadă *a energiei electromagnetice* care în unitatea de timp străbate *unitatea unghiului sferic* se evidențiază prin *valoarea numerică a vectorului* **I**, denumit sub aspect fiziologic *intensitatea de lumină*, și este măsurată în unități Hefner.

Valoarea mijlocie în raport cu o perioadă a energiei electromagnetice care în unitatea de timp străbate *unghiul sferic* $\omega$ poartă denumirea, sub aspectul fiziologic, de *flux luminos* $\Phi$ și este măsurat *în lumeni.*

Valoarea mijlocie în raport cu o perioadă a energiei electromagnetice care în unitatea de timp întîlnește *suprafața corpului* $S_m$ — reprezentînd secțiunea conului din vîrful căruia pornesc razele luminoase — reprezintă de asemenea valoarea numerică a *fluxului luminos* $\Phi$.

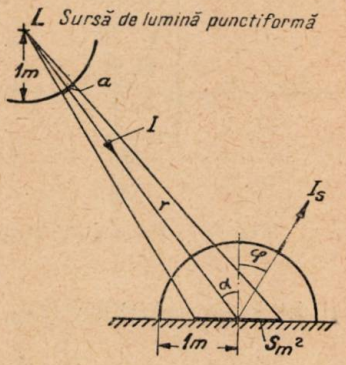


Fig. 5. — Fluxul luminos.

Împărțind pe $\Phi$ prin $S_{m^2}$ se obține *iluminarea* $E$ (a cărei unitate de măsură este luxul).

Se obține

$$\Phi_{\text{lumen}} = I_{HK}\,\omega = E_{\text{lux}}\,S_{m^2}, \tag{66}$$

în care

$$\omega = \frac{S\cos\alpha}{Y^2}. \tag{67}$$

În consecință, legăturile dintre $\Phi$, $I$ și $E$ pot fi puse sub forma

$$\frac{\Phi_{\text{umen}}}{S_{m^2}} = EK\left(\frac{\cos\alpha}{r^2}\right) = E_{\text{lux}}. \tag{68}$$

La rîndul ei, suprafața corpului $S_{m^2}$ devine o nouă sursă de lumină cu o lucire de $e_{\text{lumen/m}^2}$, considerată ca o mărime specifică.

Se obține

$$e_{\text{lumen/m}^2} = m\,E_{\text{lux}}, \tag{69}$$

*în care m exprimă însușirea suprafeței corpului care, recepționînd fluxul luminos, emite noi raze de lumină.*

*Intensitatea razei de lumină secundară* $I_s$, după Lambrecht, apare în forma (fig. 5)

$$I_{sHK} = eS\cos\varphi = m\,ES\cos\varphi = m\frac{I\cos\alpha}{r^2}S\cos\varphi. \tag{70}$$

Cînd corpul de suprafață $S$ este *translucid*, se mai obține și pentru suprafața opusă aceleia care recepționează flux luminos o lucire $e$ de forma

$$e_{\text{lumen/m}^2} = t\, E_{\text{lux}}. \tag{71}$$

*în care t evidențiază însușirea suprafeței opuse aceleia ce recepționează fluxul luminos de a emite noi raze de lumină.*

În figura 6 este reprezentat *fotometrul Bunsen*, pentru măsurarea intensității de lumină $I_2$ a sursei luminoase $L_2$.

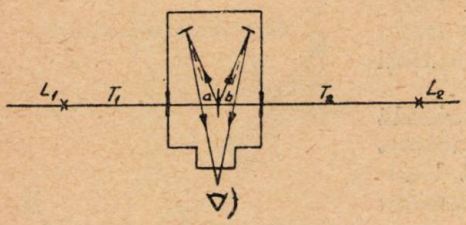



Fig. 6. — Fotometrul Bunsen.

O foaie de hîrtie cu o pată de grăsime este supusă cu fețele $a, b$, la sursele de lumină $L_1$, $L_2$ (fig. 6).

Pentru aceeași lucire a ambelor fețe ale hîrtiei

$$e_a = e_b \tag{72}$$

stabilite cu ochiul, se obține

$$\begin{aligned} e_a &= m_1 E_1 + t_2 E_2, \\ e_b &= m_2 E_2 + t_1 E_1 \end{aligned} \tag{73}$$

și în baza relațiilor (68), (72) și (73) rezultă

$$m^1 \frac{I_1}{r^2} + t_2 \frac{I_2}{r^2} = m_2 \frac{I_2}{r^2} + t_1 \frac{I_1}{r_1^2},$$

sau

$$(m_1 - t_1) \frac{I_1}{r_1^2} = (m_2 - t_2) \frac{I_2}{r_2^2}. \tag{74}$$

Se întoarce hîrtia cu pata de grăsime cu 180° în fotometru și se obține din nou

$$(m_2 - t_2) \frac{I_1}{r_1^2} = (m_1 - t_1) \frac{I_2}{r_2^2}. \tag{75}$$

Prin înmulțirea relațiilor (74) și (75) rezultă

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_1^2}{r_2 r'_2}. \tag{76}$$

Relația (76) ne arată că se poate determina experimental numai raportul $\frac{I_1}{I_2}$.

Dacă s-ar fi cunoscut experimental și produsul $I_1 I_2$, atunci $I_1$ cît și $I_2$ s-ar fi putut determina.

În cazul nostru însă sîntem constrînși să *fixăm în mod arbitrar* unitatea intensității de lumină, dat fiindcă se cunoaște numai raportul $\frac{I_1}{I_2}$.

În exemplul luat vom considera $I_1 = 1$ HK, astfel încît din formula (76) se deduce $I_2$.

**Incheiere**

În măsura în care cele dezvoltate în lucrare vor putea fi folosite la o adîncire a cercetării fenomenului, în aceeaşi măsură regretabilele confuzii care persistă încă şi azi în cadrul problemei sistemelor de măsuri vor putea fi înlăturate.

Este greşit să se trateze problema sistemelor de măsuri, folosind la întîmplare una sau mai multe formule sub un aspect pur formal.

Datorită numai faptului că se foloseşte o astfel de metodă formalistă, s-a ajuns să se facă afirmaţii eronate : că constanta dielectrică pentru spaţiul vid s-a determinat experimental, că sistemul de mărimi electromagnetic are numai 4 unităţi fundamentale fixate arbitrar, că factorul $4\pi$ nu are ce căuta în expresia divergenţei şi altele.

În lucrarea de faţă s-a arătat că metoda de cercetare ştiinţifică a fenomenului ne conduce numai atunci la stabilirea definitivă a unui sistem de mărimi cînd s-a ajuns să se determine pe cale experimentală uni ăţile mărimilor din sistem, sprijinindu-se în acest scop pe unităţile fundamentale fixate în mod arbitrar.

Ca urmare, o dată cu stabilirea definitivă a celor trei sisteme de mărimi în cadrul cercetării fenomenului electromagnetic cu cele două extreme ale sale fenomenele electrostatic şi magnetostatic, cele cinci unităţi fixate arbitrar cm, g, s, $\varepsilon_0 = 1\ [\varepsilon]$, $\mu_0 = 1\ [\mu]$ sînt de asemenea pe deplin stabilite.

În cazul cînd se consideră ca unităţi fundamentale cm, g, s, $\mu_0 = 1\ [\mu]$ $c'' = 1\ [c]$, atunci s-a văzut că „$c$" nu mai apare explicit în formule şi ca atare ne folosim în mod practic numai de unităţile cm, g, s, $\mu_0 = 1\ [\mu]$.

Prin aceasta nu înseamnă că unitatea „$c$" $= 1$ nu există.

Nu trebuie să se ignoreze faptul că în momentul cînd s-a făcut „$c$" $= 1$ s-a obţinut pentru $\varepsilon_0$ valoarea numerică $\frac{1}{c_z^2}$, valoare care n-ar fi fost cunoscută dacă „$c$" nu ar fi fost determinat experimental, cu ajutorul celor 5 unităţi fundamentale de mai sus.

S-a atras atenţia şi s-a arătat că nu $\varepsilon_0$, ci „$c$" este determinat experimental.

Dacă ţinem seama că sarcinile electrice au, în general, o astfel de repartizare în spaţiu, fie volumetrică, fie superficială, încît numai rareori le putem considera punctiforme, înseamnă că metoda evidenţierii factorului $4\pi$ — aplicată numai atunci cînd o sarcină electrică punctiformă este situată în centrul unei sfere — este nepotrivită cu starea de fapt a prezenţei în spaţiu a sarcinilor electrice.

În lucrare s-a arătat că semnificaţia factorului $4\pi$ este independentă de felul cum sînt repartizate în spaţiu sarcinile electrice.

Se arată că, ţinînd seama de definiţia divergenţei în legătură cu semnificaţia dată factorului $4\pi$, se lămureşte prezenţa acestui factor în formula divergenţei.

# СИСТЕМА МЕР, КАК СОСТАВНАЯ ЧАСТЬ СИСТЕМЫ ВЕЛИЧИН

## (КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

В настоящей работе рассматриваются системы величин, необходимых для исследования механических, электростатических, магнитостатических, электромагнитных и термических явлений, а также при фотометрических исследованиях.

Для каждого случая указываются произвольно установленные единицы с их размерами, называемые основными единицами.

Система мер CGS, установленная для исследования механических явлений дополняется новой произвольно установленной единицей ($\varepsilon_0 = 1$) для исследования электростатических явлений и затем единицей ($\mu_0 = 1$), установленной для исследования магнитостатических явлений.

Таким образом создаются две системы согласованных мер с 4 единицами и 4 измерениями в каждой, называемые: системой электрических мер и системой магнитных мер.

При исследовании электромагнитных явлений, в отношениях, содержащих в себе как электрические, так и магнитные величины, естественно появляется постоянная „$c$“, называемая „универсальной постоянной“, численное значение и размер которой должны быть таковы, чтобы равенства, выведенные с этими величинами, были применимы.

Исследование электромагнитного явления становится успешным именно тогда, когда удается определить экспериментальным путем значение постоянной „$c$“.

Отсюда следует, что при исследовании электромагнитного явления с его двумя крайностями — явлениями электростатическими и магнитостатическими — используется одна лишь система согласованных мер с 5 основными пятимерными единицами

$$\text{cm, g, s,} \quad \varepsilon_0 = 1\,[\varepsilon], \quad \mu_0 = 1\,[\mu],$$

называемая электрической магнитной системой мер.

В целях упрощения до некоторой степени численного расчета, можно включить постоянную „$c$“ либо в электрические, либо в магнитные величины; это ведет к двум новым системам уже не согласованных мер, так как они содержат 5 основных единиц и только 4 знака для обозначения размерности.

В электрической системе мер имеются основные единицы:

$$\text{cm, g, s,} \ \varepsilon_0 = 1\,[\varepsilon], \ \text{„}c\text{“} = [\mathrm{LT}^{-1}\varepsilon^{\frac{1}{2}}\mu^{\frac{1}{2}}],$$

а размерности величин как электрических, так и магнитных представляются в форме

$$[\mathrm{L}^{\alpha'}\mathrm{M}^{\beta'}\mathrm{T}^{\gamma'}\varepsilon^{\delta'}].$$

В магнитно распространенной системе мер имеются основные единицы

$$\text{cm, g, s,} \ \mu_0 = 1\,[\mu], \quad \text{„}c\text{“} = 1\,[\mathrm{LT}^{-1}\varepsilon^{\frac{1}{2}}\mu^{\frac{1}{2}}],$$

а размерности электрических и магнитных величин представляются в форме

$$[\mathrm{L}^{\alpha'}\,\mathrm{M}^{\beta'}\,\mathrm{T}^{\gamma'}\,\mu^{\delta'}].$$

В литературе нередко встречается абсурдное утверждение, что диэлектрическая постоянная пустого пространства $\varepsilon_0$ получила экспериментальным путем численное значение $0.886.10^{13}$ F/cm, тогда как следовало бы обратить внимание, что вышеприведенное численное значение относится к $\varepsilon_0$ из выражения

$$\varepsilon_0' = \frac{\varepsilon^0}{4\pi \text{ „}c\text{“}} 2.10^9 \text{ F/cm}$$

и именно тогда, когда единица $\varepsilon_0$ произвольно установлена и „$c$“ определена экспериментально, независимо от существования электромагнитной волны.

Автор предлагает теперь пользоваться магнитной системой мер с 5 основными единицами и 4 измерениями. Эта система несогласованная. Существующими практическими единицами: амперами, вольтами, кулонами, омами и пр., принадлежащими к электромагнитной системе мер (5 единиц и 3 измерения), а также практическими единицами м, кг, сек, предлагается пользоваться в пределах магнитной системы.

Система носит название системы „Джиорджи" по имени автора ее предложившего, который однако не уточнил, что магнитной системой является система несогласованная.

Одновременно с предложением ввести систему мер „Джиорджи", автор предлагает также исключить множитель $4\pi$, например, из выражения расхождения вектора **D**.

В работе указывается, что в выражении расхождения вектора, выявляющего интеграл поверхности, должен фигурировать множитель $4\pi$.

Кроме того, указывается, что множитель $4\pi$ не имеет никакой связи с формой конденсатора, и что таким образом всякое возражение, относящееся к подобной связи, является несостоятельным.

## ОБЪЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1. — Весы Томсона.
Рис. 2. — Абсолютный электродинамометр.
Рис. 3. — Изображение вектора $d\mathbf{D}$.
Рис. 4. — Силовое электрическое поле.
Рис. 5. — Световой поток.
Рис. 6. — Фотометр Бунзена.

## LE SYSTÈME DE MESURES EN TANT QUE PARTIE INTÉGRANTE DU SYSTÈME DE GRANDEURS

(RÉSUMÉ)

Le travail met en evidence les systèmes de grandeurs nécessaires à l'études des phénomènes : mécaniques, électrostatiques, magnétostatiques, electromagnetiques et thermiques, ainsi que dans la pho ometrie.

On y relève, chaque fois qu'il en est question, les unités fixées arbitrairement, ainsi que leurs dimensions, qu'on appelle *unités fondamentales.*

Le système d'unités de mesures C.G.S., établi surtout pour l'étude des phénomènes mécaniques, est complété par une nouvelle unité arbitrairement fixée ($\varepsilon_0 = 1$) pour l'étude des phénomènes électrostatiques et enfin par une autre unité ($\mu_0 = 1$) pour l'étude des phénomènes magnétostatiques.

On a, de cette manière, créé deux systèmes cohérents d'unités de mesures, comprenant chacun 4 unités et 4 grandeurs et qu'on appelle le système de mesures électrique et le système de mesures magnetique.

L'étude des phénomènes électromagnétiques, par ses relations comprenant des grandeurs électriques en même temps que des grandeurs magnétiques, conduit tout naturellement à l'apparition de la constante „$c$", appelée „constante universelle", dont la valeur numérique et la dimension, sont telles que les égalités établies avec ces grandeurs soient valables.

C'est justement dans la réussite de la détermination expérimentale de „$c$" que réside la réussite de l'étude des phénomènes électromagnétiques.

Il en résulte que pour l'étude des phénomènes électromagnetiques, y compris leurs deux extrêmes — les phénomènes électrostatiques et magnétostatiques — on emploie un système unique d'unités de mesures, cohérent, comprenant 5 unités fondamentales :

$$\text{cm, g, s, } \varepsilon_0 = 1\ [\varepsilon],\ \mu_0 = 1\ [\mu]$$

correspondant à 5 dimensions, et appelé système de mesures électrique-magnétique.

Dans le but de simplifier autant que possible le calcul numérique, on peut englober la constante „$c$" soit dans les grandeurs électriques, soit dans les grandeurs magnétiques, ce qui conduit à l'apparition de deux nouveaux systèmes de mesures qui ne sont plus cohérents, puisqu'ils comprennent 5 unités fondamentales, mais seulement 4 symboles pour les dimensions.

*Dans le système d'unités de mesures électrique-étendu*, les unités fondamentales sont :

$$\text{cm, g, s, } \varepsilon_0 = 1\ [\varepsilon],\ \text{„}c\text{"} = 1[LT^{-1}\ \varepsilon^{\frac{1}{2}}\ \mu^{\frac{1}{2}}],$$

tandis que les dimensions des grandeurs, tant électriques que magnétiques, s'expriment sous la forme :

$$[L^{\alpha}\ M^{\beta}\ T^{\gamma}\ \varepsilon^{\delta}\ ].$$

De même, *dans le système d'unités de mesures magnétique-étendu* les unités fondamentales sont :

$$\text{cm, g, s, } \mu_0 = 1\ [\mu],\ c = 1\ [LT^{-1}\ \varepsilon^{\frac{1}{2}}\ \mu^{\frac{1}{2}}],$$

bien que les grandeurs électriques et magnétiques apparaissent sous la forme :

$$[L^{\alpha'}\ M^{\beta'}\ T^{\gamma'}\ \mu^{\delta'}].$$

Dans la littérature scientifique on rencontre assez souvent l'affirmation que la valeur numérique de la constante diélectrique de l'espace

vide $\varepsilon_0$, determinée expérimentalement, est de $0{,}886 \times 10^{12}$ F/cm, au lieu de préciser que cette valeur est celle de $\varepsilon'_0$, tirée de

$$\varepsilon'_0 = \frac{\varepsilon_0}{4\pi \,,,c''} \times 2 \times 10^2 \text{ F/cm}$$

en ademettant que l'unite de $\varepsilon_0$ a été arbitrairement fixée et que „$c$' a été déterminée expérimentalement, sans tenir compte de l'existence de l'onde électromagnétique.

On propose aujourd'hui l'emploi d'un *système de mesures* magnétique-étendu, comprenant 5 unités fondamentales et 4 dimensions. C'est un système incoherent. La proposition se réfère à la l'emploi simultane, dans le système magnétique-étendu, des unités pratiques existantes : ampère, volt, coulomb, ohm, etc., appartenant au système de mesures électromagnétique (5 unités et 3 dimensions) et des unités pratique m, kg, s.

Le système porte le nom de système „Giorgi", d'après le nom savant qui l'a propoée, mais qui a omis de préciser que le système magnétique-étendu n'est pas cohérent.

En même temps que la proposition d'introduire le système de mesures „Giorgi" on a proposé d'éliminer le facteur $4\pi$, par exemple dans l'expression de la divergence du vecteur **D**.

L'auteur démontre que, dans tous les cas, l'expression de la divergence du vecteur qui met en évidence une intégrale de superficie devra comprendre le facteur $4\pi$.

Il démontre aussi que le facteur $4\pi$ ne dépend pas du tout de la forme du condensateur et que, par conséquent, toutes les objections qu'on pourait soulever à ce propos sont illusoires.

## EXPLICATION DES FIGURES

Fig. 1. — Balance de Thompson.
Fig. 2. — Electrodynamomètre absolu.
Fig. 3. — Représentation du vecteur $d\mathbf{D}$.
Fig. 4. — Tube de force dans la champ électrique.
Fig. 5. — Flux lumineux.
Fig. 6. — Photomètre de Bunsen.

## BIBLIOGRAFIE

1. E. Emde, *Abhandlung über mögliche Massysteme.* Elektr. techn. Zeitscrift, 1904 t. 25. p. 432.
2. G. Giorgi, Rev. gen. d'Electr., 1936, t. 40, p. 459, 1937, t. 42, p. 99.
3. P. Kalantaroff, *Les equations aux dimensions des grandeurs electriques et magnétiques.* Rev. gen. de l'électr., 1929, t. 25. p. 235.
4. G. Giorgi, *Rational units of electromagnetism.* Proc. Phys, Soc. Londra, 1902.
5. I. E. Tamm, *Bazele teoriei electricităţii* Ed. energetică, Bucureşti, 1949.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 3, 1956

*ELECTROENERGETICĂ şi ELECTROTEHNICĂ*

# MODELELE ELECTRODINAMICE ALE SISTEMELOR ELECTROENERGETICE

## MODELAREA GENERATOARELOR SINCRONE

DE

C. APETREI şi M. ELEFTERESCU

### I. CONSIDERAŢII PRELIMINARE

Modelul electrodinamic al sistemelor electroenergetice este reprezentat de o instalaţie compusă din elemente motoare (turbină cu abur, turbină hidraulică, motoare cu ardere internă sau motoare electrice, modele ale acestora), elemente generatoare (generatoare şi compensatoare sincrone), elemente transformatoare, elemente de transport şi distribuţie electrică, elemente consumatoare de energie electrică (sarcini active sau

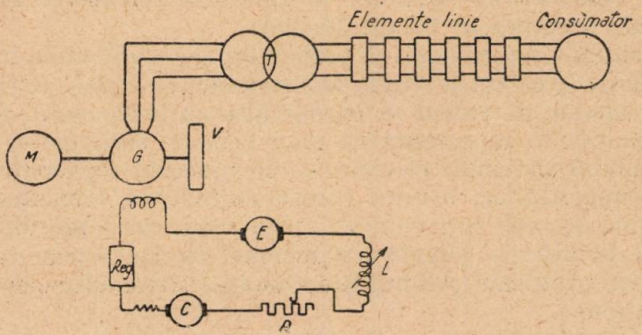



Fig. 1

reactive, statice sau turnante) şi elemente de comandă, control, înregistrare şi reglare automată. În figura 1 sînt reprezentate schematic elementele principale ale unui model electrodinamic.

Elementele mai sus enumerate, construite pe baza anumitor legi de asemănare, permit ca la o scară redusă să se reprezinte sistemul electro-

energetic real; dat fiind structura modelului, identică cu aceea a sistemelor originale, va fi posibilă crearea regimurilor de funcționare, normale și de avarie, întîlnite în practica de exploatare a sistemelor electrice; mai mult, se vor putea imagina și realiza regimuri de funcționare noi, în scopul de a se reliefa și studia comportarea diferitelor elemente componente ale sistemelor electrice în parte și în ansamblul lor.

Modelul electrodinamic prin structura sa, ca și prin natura fenomenelor care pot fi reproduse cu ajutorul său — structură și natură identică sistemelor electrice de mare putere întîlnite în practică — reprezintă un exemplu clasic de model fizic.

Modelele fizice și matematice — modele care prin structura și natura fenomenelor reproduse diferă de originalul modelat, dar ale căror fenomene sînt guvernate de legi exprimate sub formă matematică identică — obțin în activitatea de cercetare o utilizare din ce în ce mai largă. În legătură cu aceasta este necesar să se sublinieze cîteva probleme care reliefează concepția modernă relativă la introducerea modelării în activitatea de cercetare științifică:

— modelarea urmează a fi privită ca o metodă de cercetare care completează metoda teoretico-analitică; ea dă posibilitatea cercetării intime a naturii fenomenelor, se sprijină și completează aparatul matematic;

— modelarea fizică față de modelarea matematică prezintă atît avantaje, cît și dezavantaje; este de preferat însă prima metodă în toate cazurile cînd în cercetare interesează pe lîngă aspectul cantitativ al fenomenelor și aspectul lor calitativ;

— modelarea dinamică a sistemelor electrice nu poate fi privită cu exclusivitate față de alte modelări; mesele de calcul în curent continuu sau curent alternativ, diferitele mașini de calcul etc. au un rol important în cercetarea și calculul sistemelor electrice; trebuie subliniate totuși calitățile modelelor dinamice în cercetarea fenomenelor tranzitorii, în evidențierea comportării dinamice a diferitelor elemente ale sistemelor electrice și ale acestora în totalitatea lor.

Pentru sublinierea calităților modelului electrodinamic în comparație cu alte auxiliare de calcul și studiu al sistemelor electrice, se vor considera, ca exemplu, mesele de calcul în curent alternativ; acestea, după cum se cunoaște, constau în reprezentarea unor scheme electrice — la care s-au redus în prealabil sistemele electrice — cu ajutorul rezistențelor, inductivităților și capacităților, asupra cărora acționează tensiuni monofazate de amplitudine și fază convenabilă; prin măsurarea mărimilor electrice caracteristice în diferite puncte ale schemei realizate prin calcul, se pot rezolva diferite probleme privind funcționarea sistemului electric în regim simetric, staționar.

Dacă se vor studia regimuri staționare nesimetrice sau regimuri de funcționare tranzitorii, va fi necesară reproducerea succesivă a schemelor echivalente corespunzătoare (a celor 3 secvențe în cazul regimurilor nesimetrice, introducerea parametrilor caracteristici regimurilor tranzitorii sau supratranzitorii etc.) și în urmă efectuarea măsurătorilor și a calculelor necesare pentru fiecare schemă în parte ; din acest punct de vedere deci, mesele de calcul în curent alternativ pot fi considerate ca elemente statice, care pot reproduce anumite stări ale sistemului electric, existente la un moment dat, de o configurație bine definită. De asemenea, cu ajutorul

meselor de calcul, influența și comportarea unor elemente componente din sistem, cum ar fi sistemul de excitație a generatoarelor sincrone, aparatajul de reglare continuă, de control și protecție etc., nu poate fi urmărită direct.

Este de reținut deci că mesele de calcul în curent alternativ se pot utiliza pentru cercetarea sistemelor electrice numai după ce în prealabil s-a rezolvat problema schemelor echivalente ale sistemului ce interesează, reproducerea sistemului în diferite stări putîndu-se face numai succesiv din aproape în aproape.

Spre deosebire de mesele de calcul, modelele dinamice ale sistemelor electrice permit :

— reproducerea, urmărirea continuă și înregistrarea fenomenelor de natură electromagnetică și electromecanică atît în timpul regimurilor de funcționare staționară, cît și al acelora tranzitorii, simetrice sau nesimetrice ;

— stabilirea directă a comportării diferitelor elemente care intră în structura sistemului electric și a influenței manifestată de acestea asupra regimului de funcționare a sistemului electric în întregime ; din acest punct de vedere prezintă deosebită importanță cercetarea sistemului de excitație a generatoarelor sincrone, a sistemului de reglare a tensiunii și forțare a excitației, aparatajul de protecție, etc. ;

— verificarea directă a anumitor rezultate stabilite teoretic și aprecierea erorilor de calcul, în cazul cînd problemele se rezolvă cu anumite ipoteze simplificatoare ; în acest sens, trebuie subliniat faptul că modelul dinamic nu necesită decît reproducerea schemelor reale ale sistemelor electrice și nu a unor scheme echivalente, a căror stabilire este o operație de natură teoretică de multe ori dificilă și supusă erorilor.

Aceste calități fac din modelul dinamic o unealtă prețioasă în studiul și cercetarea sistemelor electrice în general, permițînd totodată dezvoltarea comodă și suficient de exactă a unor probleme concrete legate de funcționarea în bune condiții a sistemelor electroenergetice din R.P.R.

În cadrul articolului de față vom reda, după o scurtă prezentare a noțiunilor privind utilizarea aparatului matematic în modelarea fizică, studiul unuia din elementele principale ale modelului dinamic, generatorul sincron ; se vor deduce criteriile de asemănare și se vor reliefa problemele practice ridicate de proiectarea și realizarea modelelor generatoarelor sincrone de mare putere. În încheiere se va prezenta generatorul model studiat și proiectat în Institutul de energetică al Academiei R.P.R.

## II. NOȚIUNI PRIVIND UTILIZAREA APARATULUI MATEMATIC ÎN MODELAREA FIZICĂ

Pentru ca fenomenele ce au loc în model să reproducă fenomenele din original — în timp și în spațiu — între parametrii care caracterizează modelul din punct de vedere geometric, electric, magnetic și mecanic și cei care caracterizează originalul, trebuie să existe anumite relații ; relațiile respective, după cum se cunoaște, constituie criteriile de asemănare — criteriile de similitudine.

În modelarea fizică a sistemelor electrice, ca în oricare alt gen de modelare de altfel, în funcție de scopul urmărit, ca și de posibilitățile

practice de realizare, se poate avea o modelare exactă — reproducerea fenomenelor asemenea în timp şi în spaţiu, sau o modelare aproximativă — reproducerea fenomenelor în timp sau în spaţiu.

Teoria modelării electrodinamice a sistemelor electrice porneşte de la teoremele generale ale asemănării fizice:

— sistemele asemenea au aceleaşi criterii de asemănare;

— în cercetarea oricărui fenomen fizic pot fi stabilite legături funcţionale nu numai direct între mărimile fizice care caracterizează fenomenul dat, ci şi între anumite combinaţii ale acestora, combinaţiile respective fiind fără dimensiuni;

— pentru ca două fenomene să fie asemenea este necesar şi suficient ca criteriile de asemănare stabilite pentru cele două fenomene să fie identice, iar condiţiile de univocitate — condiţii ce definesc particularităţile unui fenomen concret şi care se referă la proprietăţile geometrice, parametrii fizici, starea iniţială şi condiţiile de limită ale sistemului — să fie asemenea.

Acestor teoreme generale li se adaugă condiţii speciale în cazul sistemelor compuse sau neliniare, neomogene sau anizotrope.

Stabilirea condiţiilor de asemănare, respectiv a criteriilor de asemănare, în cazul modelării fizice, poate fi făcută în mai multe moduri; se vor aminti două din acestea:

*a*) Metoda analizei ecuaţiilor constă, în principiu, în determinarea ecuaţiilor ce definesc fenomenul dat*) şi în urmă, pe baza acestor ecuaţii, în stabilirea unor combinaţii fără dimensiuni între parametrii ce caracterizează modelul şi originalul; în fond operaţia se reduce la transformarea ecuaţiilor prin împărţirea tuturor termenilor ei cu unul din termeni; în acest mod se obţine o relaţie ai cărei termeni sînt fără dimensiuni, identitatea termenilor respectivi pentru model şi original reprezentînd chiar criteriile de asemănare; metoda respectivă se va reliefa în cele ce urmează în cazul concret al maşinii sincrone.

*b*) Metoda determinării matricei operatorului de transformare, rezultă din aplicarea algebrei liniare în studiul asemănării fizice.

Într-adevăr, dacă se ia un sistem fizic care urmează să fie modelat şi dacă reprezentarea desfăşurării în timp a proceselor se face cu ajutorul a $n$ mărimi fizice ale spaţiului $n$-dimensional sub forma unui vector, [1],

$$x_i = f(x_{1i}, x_{2i}, \ldots, x_{ni}), \tag{1}$$

se poate demonstra că asemănarea sistemelor considerate necesită transformarea vectorilor dintr-un spaţiu asociat originalului într-un spaţiu asociat modelului. Transformarea vectorilor se face prin intermediul operatorului liniar de forma

$$(x_{1i}, x_{2i}, \ldots, x_{ni}) = \| C_i \| (x_{11}, x_{21}, \ldots, x_{n1}). \tag{2}$$

În relaţiile (1) şi (2) $x_{1i}, x_{2i}, \ldots, x_{ni}$ sînt parametrii fizici şi funcţionali ai sistemului, $i = 1,2, \ldots, m$ reprezintă numărul spaţiului, iar $\| C_i \|$ este matricea operatorului care transformă spaţiile sistemelor asemenea.

*) Stabilirea criteriilor de asemănare se poate face şi fără cunoaşterea ecuaţiilor fenomenului ce interesează prin aplicarea teoremei II, cunoscută în literatură sub denumirea de teorema lui Buckingham.

Matricea $\| C_i \|$ are forma

$$\| C_i \| = \begin{Vmatrix} C_{1i} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_{2i} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & C_{3i} \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & C_{ni} \end{Vmatrix}$$

cu $n$ rînduri şi $n$ coloane.

Condiţia pentru ca sistemele considerate să fie asemenea constă în aceea că toţi termenii din diagonala matricei $\| C_i \|$ să fie mărimi fără dimensiuni. Determinînd deci matricea $\| C_i \|$ se determină şi condiţiile, respectiv criteriile asemănării fizice.

Utilizarea algebrei liniare în teoria asemănării fizice prezintă o deosebită importanţă în cazul cînd modelarea exactă, din diferite cauze, nu este posibilă (cazul curent întîlnit în practica modelării); în aceste cazuri, cu ajutorul coeficienţilor scară, convenabili aleşi pentru diferitele subspaţii — subspaţii în care s-a descompus spaţiul $n$-dimensional $i$ — se pot stabili criterii e de asemănare şi deci realiza modele care vor reproduce fenomenele din original fără să fie respectate totuşi condiţiile modelării exacte.

## III. STABILIREA CRITERIILOR DE ASEMĂNARE ÎN CAZUL MODELĂRII GENERATORULUI SINCRON

Parametrii funcţionali ai generatoarelor sincrone de mare putere diferă mult de cei ai generatoarelor de mică putere; de exemplu, maşinile de mare putere sînt caracterizate de inerţii electromagnetice şi mecanice relativ mari, de ordinul secundelor şi chiar al zecilor de secunde, în timp ce aceleaşi inerţii, în cazul maşinilor de mică putere, sînt în general de ordinul fracţiunilor de secundă, rareori depăşind o secundă.

Pentru ca totuşi fenomenele din maşina model — maşini de puteri de ordinul kW sau a zecilor de kW — să reproducă fidel, fenomenele din maşina original — maşini de puteri de ordinul MW sau a zecilor de MW — între parametrii modelului şi ai originalului trebuie să existe relaţii bine definite; determinarea acestor relaţii constituie obiectul paragrafului de faţă.

Pentru aceasta se va porni de la ecuaţiile generale ale maşinii sincrone şi se va aplica metoda analizei ecuaţiilor. Procedeul este general valabil, şi, în mod analog, se va putea proceda în cazul cînd interesează determinarea criteriilor de asemănare pentru celelalte elemente ale modelului electrodinamic.

Ecuaţiile maşinii sincrone pot fi scrise sub următoarea formă:

$$r_a i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} = -e_0, \tag{3}$$

$$r_a i_d + L_d \frac{di_d}{dt} + L_q i_q \frac{d\theta}{dt} + M_d \frac{di_r}{dt} = -e_d, \tag{4}$$

$$-L_d\, i_d \frac{d\theta}{dt} + r_a\, i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - M_d\, i_r \frac{d\theta}{dt} = -e_q \tag{5}$$

$$\frac{3}{2} M_d \frac{di_d}{dt} + r_r\, i_r + L_r \frac{di_r}{dt} = e_r, \tag{6}$$

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = M_m - (M_0 + M_{sc} + M_n). \tag{7}$$

S-au considerat ecuațiile mașinii sincrone sub forma lor cea mai generală, în cazul cînd pe rotor este dispusă o singură înfășurare, înfășurarea de excitație.

În ecuațiile (3), (4), ..., (7) s-a notat cu :

$i_0$, $i_d$, $i_q$, componenta homopolară, longitudinală și transversală a curentului din indus,

$e_0$, $e_d$, $e_q$, aceleași componente pentru sistemul tensiunilor la bornele mașinii,

$i_r$, $e_r$, curentul și tensiunea ce acționează în circuitul de excitație,

$L_0$, $L_d$, $L_q$, inductivitatea homopolară, longitudinală și transversală a circuitului indus,

$M_d$, inductivitatea mutuală dintre circuitele inductor și indus,

$r_a$, $r_r$, rezistența circuitului indus, respectiv de excitație,

$\theta$, unghiul dintre axa longitudinală a mașinii și axa magnetică a fazei $a$,

$J$, momentul de inerție al maselor rotitoare ale agregatului motor-generator,

$M_m$, $M_0$, $M_{sc}$, $M_n$, cuplul motor, cuplul corespunzător pierderilor în gol, în scurt circuit, și puterii utile la bornele mașinii.

Dacă se consideră ecuația (3) și se împarte cu $r_a i_0$, se obține

$$1 + \frac{L_0}{r_a i_0} \frac{di_0}{dt} = -\frac{e_0}{r_a i_0},$$

relație între parametrii mașinii în care termenii sînt fără dimensiuni.

Dacă se consideră aceeași scară de timp, în model și în original*), și dacă se trece de la mărimi infinit mici la mărimi finite [2], relația de mai sus arată că pentru reproducerea fenomenelor din original cu ajutorul modelului este necesar ca

$$\left(\frac{L_0}{r_a}\right)_{\text{model}} = \left(\frac{L_0}{r_a}\right)_{\text{original}} ; \left(\frac{e_0}{r_a i_0}\right)_{\text{model}} = \left(\frac{e_0}{r_a i_0}\right)_{\text{original}}$$

ceea ce vom nota cu

$$\frac{L_0}{r_a} = \text{idem}, \frac{e_0}{r_a i_0} = \text{idem}. \tag{3'}$$

*) Schimbarea scării timpului pentru model față de original, pe lîngă unele avantaje ce le-ar putea oferi, este legată de o serie de dificultăți practice, ca : mărirea constantei de inerție a modelului, greutatea modelării pierderilor prin histerezis și curenți circulari, greutăți în modelarea mașinii motoare, necesitatea aparatajului de măsură special etc.

Relațiile (3′) reprezintă criteriile de asemănare stabilite pe baza ecuației (3) și definesc egalitatea constantelor de timp și faptul că tensiunile homopolare la bornele modelului și originalului trebuie să se găsească în același raport cu căderile de tensiune în rezistența $r_a$, în model și original, atunci cînd înfășurarea indusului este străbătută de curentul homopolar $i_0$.

Dacă se trece la reactanțe, și parametrii respectivi ai mașinii sincrone se consideră dați în unități relative, se obține

$$\underline{x}_0 = \text{idem}, \quad \underline{r}_a = \text{idem}, \quad \underline{e}_0 = \text{idem}, \quad \underline{i}_0 = \text{idem}. \tag{8}$$

Procedînd în mod analog pentru ecuațiile (4), (5), (6) se poate obține restul criteriilor de asemănare :

$$\underline{x}_d = \text{idem}, \quad \underline{x}_q = \text{idem}, \quad \underline{x}_r = \text{idem}, \quad \underline{r}_r = \text{idem},$$
$$\underline{e}_d = \text{idem}, \quad \underline{i}_d = \text{idem etc.} \tag{9}$$

Pe baza criteriilor $\underline{x}_d = \text{idem}$, $\underline{x}_q = \text{idem}$ rezultă de asemenea

$$\underline{x}_s = \text{idem}, \quad \underline{x}_{ad} = \text{idem}, \quad \underline{x}_{aq} = \text{idem}, \quad \underline{x}'_d = \text{idem}. \tag{10}$$

Notațiile de mai sus sînt notațiile utilizate curent pentru parametrii mașinii sincrone.

Înainte de a trece la stabilirea criteriilor de asemănare pe baza ecuației (7), sînt necesare cîteva precizări asupra pierderilor din mașina sincronă ; pierderile respective s-au împărțit în :

*a*) pierderi în gol ($p_0$), reprezentate de pierderile mecanice și pierderile în fierul statoric, cărora li se asociază de asemenea pierderile pulsatorii și de suprafață în fierul rotorului și statorului mașinii.

*b*) pierderi la scurt circuit ($p_{sc}$), reprezentate de pierderile în cuprul statoric — rezistența indusului fiind măsurată în curent continuu — și pierderile suplimentare care apar la funcționarea mașinii în sarcină și care în principiu sînt determinate de cîmpul de scăpări al indusului

$$p_{sc} = p_{Cu.sc} + p_{supl} = m I_{sc}^2 r + p_{supl}.$$

Dacă pierderile la scurt circuit ($p_{sc}$) se presupun proporționale cu patratul curentului, $p_{sc} = m r_a I_{sc}^2$, atunci se poate determina rezistența înfășurării indusului sub forma

$$r_a = \frac{p_{sc}}{m I_{sc}^2},$$

care stabilește valoarea rezistenței înfășurării indusului mașinii sincrone în cazul cînd pierderile suplimentare din mașină se consideră că afectează rezistența în curent continuu a indusului ; această valoare $r_a$ s-a introdus în ecuațiile (3), (4), (5).

Dacă în ecuația (7) a mașinii sincrone se împarte cu $M_n$, prin transformări simple, se obțin criteriile de asemănare

$$H_j = \text{idem}, \quad \frac{p_0}{P_n} = \text{idem}, \quad \frac{p_{sc}}{p_n} = \text{idem}, \quad \frac{P_m}{P_n} = \frac{1}{} = \text{idem}, \tag{11}$$

unde $H_j$ este constanta de inerţie a maselor rotitoare ale agregatului motor-generator.

Relaţiile (11) stabilesc:

— identitatea constantelor de inerţie ale modelului şi originalului;

— identitatea pierderilor în gol, la scurtcircuit, sau a pierderilor globale raportate la puterea utilă dela bornele maşinii $P_n$ (puterea bază a maşinii) pentru model şi original.

Legat de respectarea criterului $\frac{p_0}{P_n}$ = idem, trebuie semnalată dificultatea ivită în realizarea unei maşini model cu pierderi în fier, raportate la puterea bază, egale cu pierderile similare raportate la puterea nominală a maşinii original; de aceea practic, ori se va renunţa la respectarea acestui criteriu, ori se va construi o maşină alegînd pentru circuitul ei magnetic o tolă cu pierderi specifice minime.

Pe baza analizei efectuate mai sus asupra ecuaţiilor maşinii sincrone se pot conclude următoarele:

*a*) Ecuaţiile (3) ... (7) determină desfăşurarea în timp a fenomenelor de natură electromagnetică şi mecanică; criteriile de asemănare deduse pe baza analizei acestor ecuaţii stabilesc:

— identitatea constantelor de timp a circuitelor electrice ale maşinii sau identitatea parametrilor săi funcţionali, în unităţi relative;

— identitatea constantelor de inerţie a maselor rotitoare ale agregatului;

— identitatea pierderilor în gol şi la scurtcircuit sau a pierderilor globale raportate la puterea bază a maşinii;

— identitatea condiţiilor iniţiale, tensiuni, curenţi etc., exprimate în unităţi relative.

Modelul realizat pe baza criteriilor de mai sus va fi un model care va permite reproducerea desfăşurării în timp a fenomenelor electromagnetice şi mecanice din original fără a se avea în vedere în mod special reproducerea acestora şi în spaţiu.

*b*) Dat fiind că în maşina sincronă fenomenele electromagnetice vor fi neliniare — datorită saturaţiei fierului maşinii îndeosebi — la criteriile stabilite mai sus va trebui adăugat criteriul care să permită reproducerea fenomenelor neliniare; aceasta va avea loc cu suficientă exactitate în cazul cînd caracterist ca de magnetizare în unităţi relative va fi identică pentru model şi original; deci,

$$\underline{\varphi} = f(i_r) = \text{idem}. \tag{12}$$

*c*) Modelul realizat pe baza criteriilor stabilite — (8), (9), (10), (11) şi (12) — deşi va permite modelarea desfăşurării fenomenelor în timp, va introduce totuşi anumite erori determinate îndeosebi de nerespectarea completă a asemănării în spaţiu între model şi original; de asemenea, vor fi introduse erori dat fiind că relaţia (12) defineşte asemănarea caracteristicilor de magnetizare ale maşinii doar la funcţionarea în gol, iar efectul saturaţiei la funcţionarea în sarcină a maşinii se va manifesta evident în mod diferit. Analiza erorilor poate fi făcută utilizînd diferite metode analitice sau experimentale; această analiză demonstrează că erorile introduse sînt admisibile, ele neîntrecînd erorile introduse de calculul analitic în mod obişnuit [1].

## IV. PROBLEME PRACTICE ÎN MODELAREA GENERATORULUI SINCRON

În realizarea practică a modelelor generatoarelor sincrone — ca de altfel în realizarea modelului electrodinamic în ansamblu — pot exista două drumuri distincte: primul constă în realizarea unui model care să reprezinte un anumit original bine determinat; realizarea unui astfel de model este justificată doar în cazul cînd generatorul original prezintă o importanță determinantă pentru funcționarea sistemului electric în ansamblu, sistem cu caracteristici principial noi, în comparație cu cele existente (de exemplu, modelarea generatoarelor Kuibîșev în sistemul electroenergetic Kuibîșev-Moscova); un al doilea drum constă în realizarea unui model cu caracter universal, care să permită variația parametrilor funcționali în limite cît mai largi pentru acoperirea unei game variate de generatoare existente într-un sistem electroenergetic oarecare; este calea care se impune, de exemplu, în realizarea modelelor generatoarelor sincrone existente în sistemele noastre electroenergetice.

O altă problemă importantă care se pune în realizarea practică a unui model constă în alegerea tipului de mașină ce urmează să modeleze generatorul de mare putere; în prima perioadă a dezvoltării modelării electrodinamice metoda constă în alegerea unei mașini sincrone de construcție normală la care, prin alegerea judicioasă a puterii bază, prin conectarea unor elemente reactive sau rezistive exterioare mașinii, se căuta să se apropie pe cît posibil mai mult parametrii funcționali ai modelului de cei ai originalului. Metoda actuală în modelare constă însă în a studia, proiecta și construi mașini speciale model, utilizîndu-se la maximum posibil gabaritele mașinilor de construcție obișnuită.

După ce s-au fixat aceste aspecte generale, problema proiectării modelului generatorului se pune în modul următor: se dau criteriile de asemănare ce urmează a fi îndeplinite de original și model, fiind necesar să se determine dimensiunile modelului.

Pentru rezolvarea acestei probleme urmează ca în prealabil să se stabilească relațiile de legătură dintre parametrii funcționali ai mașinii și parametrii săi constructivi; relațiile respective se stabilesc pe baza elementelor fundamentale privind proiectarea mașinii sincrone, cu observația că elementele întîlnite curent în proiectarea mașinii sincrone trebuie puse sub formă transformată pentru ca să apară în mod explicit variația parametrilor mașinii în funcție de dimensiunile sale. Astfel, relațiile date în [4] pot fi puse sub forma

$$\underline{x}_{ad} = k \frac{P_n}{p.\tau l} \frac{1}{\delta B_\delta^2}, \tag{13}$$

$$\underline{x}_{aq} = \frac{K_q}{K_d} \underline{x}_{ad}, \tag{14}$$

$$\frac{x_s}{x_{ad}} = K_0 \frac{\delta}{\tau} q, \tag{15}$$

$$\frac{r}{x_{ad}} = k_1 \frac{\delta\rho}{\tau^2 h_d}, \tag{16}$$

$$\frac{K_{sc} r}{x_{ad}} = K_2 \frac{h_d p_d}{\delta}, \tag{17}$$

$$\underline{p}_{Fej} \cdot x_{ad} = K_3 \frac{\tau^2}{\delta} \frac{p_j}{h_j}, \tag{18}$$

$$\underline{p}_{Fed} \cdot x_{ad} = K_4 \frac{h_d p_d}{\delta}, \tag{19}$$

$$\frac{r_r}{x_{ad}} = K_5 \frac{\delta \rho_+}{\tau Q_{r\tau}}, \tag{20}$$

$$H_j = K_6 \frac{\tau^5 p^2}{P_n} \frac{l}{\tau} \cdot \tag{21}$$

În relațiile de mai sus s-a notat cu :

$\delta$, $l$, întrefierul, respectiv lungimea de calcul a mașinii ;

$h_d$, $h_j$, înălțimea dintelui, respectiv a jugului statorului ;

$p$, $q$, numărul perechilor de poli, respectiv al crestăturilor pe pol și fază ;

$Q_{r\tau}$, secțiunea de cupru pentru un pas polar al înfășurării de excitație ;

$P_n$, puterea bază (puterea utilă la bornele mașinii) ;

$\underline{p}_d$, $\underline{p}_j$, pierderi specifice în fierul dinților, respectivi al jugului statorului ;

$\underline{p}_{Fed}$, $\underline{p}_{Fej}$, pierderi relative în fierul dinților, respectiv al jugului statorului ;

$K_{sc}$, raportul dintre pierderile suplimentare și pierderile în rezistență la scurtcircuit ;

$K$, $K_0$, $K_1$, ..., $K_6$, coeficienți de proporționalitate cu sau fără dimensiuni.

Dacă se analizează relațiile de mai sus, pot fi făcute următoarele observații :

*a*) Relațiile (13) ... (21) scot în evidență influența ce o au parametrii constructivi (dimensiunile, inducția în întrefier etc.) asupra parametrilor funcționali ai mașinii sincrone,

*b*) Din analiza acestor relații se pot fixa orientativ valorile optime ale diferiților parametri constructivi, cum ar fi valorile lui $\tau$, $\delta$, $\beta_\delta$, $p$, $l$ etc., astfel că relațiile de mai sus să fie pe cît posibil satisfăcute ; avîndu-se fixate orientativ aceste valori, cu ajutorul relațiilor fundamentale privind proiectarea mașinilor sincrone, se poate dimensiona mașina model.

*c*) Relațiile indicate mai sus scot în evidență influența determinantă pe care o manifestă alegerea puterii bază a modelului $P_n$, asupra diferiților parametri funcționali ai mașinii ; acest lucru prezintă o mare importanță, deoarece prin varierea puterii de bază se dă posibilitatea varierii parametrilor în cazul unei mașini model deja construită.

*d*) Anumiți parametri constructivi, conform relațiilor de mai sus manifestă o influență contradictorie asupra parametrilor funcționali ai mașinilor (de exemplu, influența raportului $\frac{\delta}{\tau^2}$ asupra valorilor $\frac{r}{x_{ad}}$ și

$p_{Fej} \cdot \underline{x}_{ad}$); această observație oferă indicii asupra greutăților ridicate de proiectarea generatoarelor sincrone model.

*e*) Date fiind dificultățile practice întîlnite în realizarea modelului, generatorului, urmează ca alegerea parametrilor constructivi să se facă urmărind satisfacerea relațiilor (13)....(17) și (21) creînd totodată condiții favorabile pentru satisfacerea relațiilor (18)... (20); satisfacerea primelor relații în general este posibilă fără greutăți deosebite.

*f*) Respectarea relațiilor (18) ... (20), cînd se modelează mașini de mare putere și foarte mare putere (mașini de ordinul MW și chiar a sutelor de MW), este legată de serioase dificultăți și problema se poate rezolva numai dacă se iau măsuri speciale; printre acestea se pot enumera utilizarea unor tole speciale cu pierderi specifice minime, respectarea criteriului $\frac{p_0}{P_n}$ = idem, respectiv relațiile (18) și (19) și adoptarea unei metode speciale pentru compensarea rezistenței circuitului de excitație al mașinii sincrone cu ajutorul unei mașini electrice rotative (mașină cu colector serie de curent continuu) sau cu ajutorul unor scheme electronice. În cazul compensării rezistenței $r_r$, valoarea obținută constructiv trebuie să fie în așa fel încît gradul de compensare necesar să nu depășească valoarea $2 \div 3$.

## V. GENERATORUL SINCRON MODEL REALIZAT LA INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

În cadrul cercetărilor de la Institutul de energetică — duse în vederea realizării unui model electrodinamic — s-a studiat și proiectat un generator sincron model.

Dat fiind caracterul variat al cercetărilor care urmează a fi efectuate cu ajutorul modelului electrodinamic, generatorul model urmează să aibă un caracter mai mult sau mai puțin universal; se au deci în vedere posibilitățile de variere a parametrilor funcționali în limite largi; în cazul de față, generatorul model urmează să reproducă parametrii funcționali caracteristici generatoarelor sincrone — turbo- și hidrogeneratoare — cu puteri cuprinse între 5 MVA și 30 MVA.

Generatorul model s-a proiectat ca o mașină specială cu două rotoare — unul cu poli aparenți și unul cu poli înecați — folosindu-se la maximum posibil unele piese și subansamble din producția curentă a fabricii „Clement Gottwald" din București.

Proiectarea generatorului model s-a făcut folosindu-se metodica obișnuită de proiectare a mașinilor sincrone; în proiectare s-a urmărit satisfacerea criteriilor de asemănare stabilite în cadrul lucrării de față — relațiile (8)...(12) — luîndu-se ca parametri funcționali ai originalului, parametri caracteristici generatoarelor sincrone de puteri cuprinse între $5 \div 30$ MVA.

Alegerea parametrilor constructivi principali, ca și a unor caracteristici funcționale, s-a făcut pe baza relațiilor (13) ... (21) și a unor considerente practice, cum ar fi alegerea unei tensiuni convenabile manipulărilor de laborator, operarea cu puteri active și reactive convenabile condițiilor de lucru din laborator, adoptarea frecvenței industriale standardizate etc.

În acest mod s-a ajuns la o variantă de generator model cu următoarele date principale:

$P_n = 12$ kVA, $U = 400/231$ V, $f = 50$ Hz, $n = 1\,000$ rot/min,
$\cos \varphi = 0{,}8$, $A = 48$ A/cm, $B_\delta = 0{,}517$ Wb/m$^2$, $\tau = 26$ cm,
$l = 17{,}7$ cm, $\delta = 0{,}15$ cm.

Pentru realizarea parametrilor caracteristici generatoarelor de mare putere s-au ales pentru întrefier valori minim admisibile din punct de vedere mecanic; în cazul rotorului cu poli aparenți s-au prevăzut posibilități de variație a valorii întrefierului prin introducerea unor șaibe din același material ca și polul.

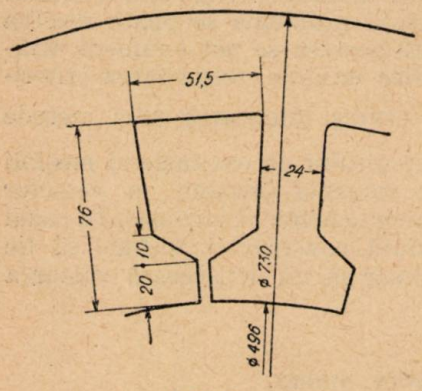



Fig. 2

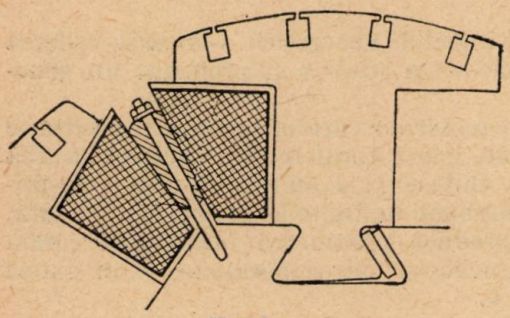


Fig. 3 *a*

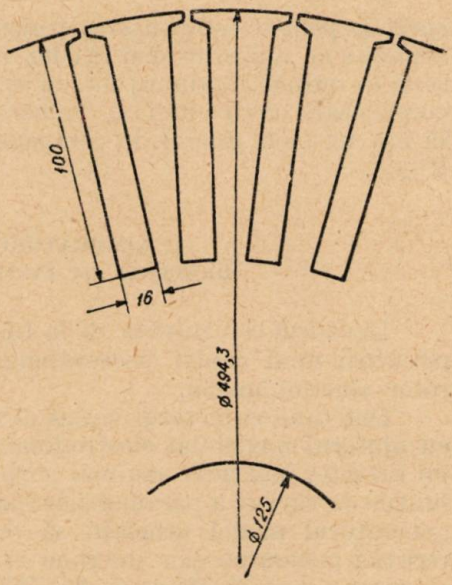



Fig. 3 *b*

Pentru crestătura statorică s-a ales forma specială reprezentată în figura 2.

În cazul variantei generator sincron cu poli aparenți s-au prevăzut înfășurări de amortizare în axa longitudinală sau în ambele axe, utilizîndu-se la maximum spațiul de pe rotor, disponibil pentru așezarea înfășurării de excitație.

Subansamblul rotor, în cazul celor două variante, este reprezentat în figurile 3 *a* și 3 *b*.

Generatorul sincron, model proiectat în cele două variante, reușește să reproducă parametrii generatoarelor de mare putere după cum urmează:

— rezistența înfășurării statorice în care s-au inclus și pierderile suplimentare la scurtcircuit ($r_a$);

— diferitele reactanțe caracteristice ale mașinilor sincrone;
— constanta de inerție a agregatului;
— caracteristica de magnetizare.

În tabloul nr 1, pentru comparație, s-au reprodus caracteristicile generatoarelor sincrone de mare putere, caracteristicile unor generatoare model realizate în Uniunea Sovietică și caracteristicile generatorului model în cele două variante studiate și proiectate de Institutul de energetică; de asemenea, în figura 4 s-a reprezentat caracteristica de magnetizare standard și caracteristica de magnetizare a generatorului model în cele două variante

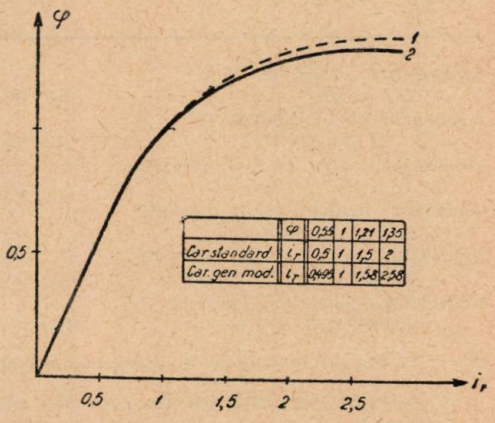



Fig. 4

Datele din tabloul nr. 1 ca și caracteristica de magnetizare a modelului, reprezentată în figura 4, arată că parametrii modelului se apropie de parametrii specifici generatorilor de mare putere; vom indica totodată și posibilitățile ce există pentru variația parametrilor generatorului model.

Înainte de a se trece la dezvoltarea acestei probleme este necesar să se observe că pierderile în fier raportate la puterea de bază a modelului n-au putut fi reproduse, dată fiind tola obișnuită, cu pierderi relativ mari, utilizată pentru construcția modelului; de asemenea, trebuie remarcat că valoarea rezistenței circuitului de excitație s-a obținut relativ mare, acest lucru fiind determinat îndeosebi de considerente mecanice: forțele centrifuge ce pot apărea la ambalarea mașinii, funcționînd cu caracteristici cuplu-viteză, proprii turbinelor hidraulice, au limitat superior secțiunea cuprului înfășurării de excitație. În acest mod, valorile constantelor de timp ale circuitului de excitație cu indusul deschis, $T_{d0}$, s-au obținut relativ mici (2,14 pentru varianta cu poli aparenți, respectiv 2,6 pentru varianta cu poli înecați); ceea ce trebuie însă subliniat este faptul că gradul de compensare a rezistenței circuitului de excitație, obținută constructiv, nu trebuie să depășească valoarea $2 \div 3$ pentru a se obține constante de timp $T_{d0}$ specifice mașinilor cu puteri de ordinul a 30 MVA.

Variația parametrilor funcționali ai generatorului model se poate efectua prin diverse mijloace constructive sau prin acționarea asupra schemei mașinii model din exterior.

Printre măsurile de ordin constructiv trebuie amintite următoarele:

*a*) Construirea a două rotoare — unul cu poli aparenți și altul cu poli înecați — care să funcționeze cu același stator; în acest mod se dă posibilitatea ca, cu același stator, să se realizeze parametri caracteristici hidrogeneratoarelor, respectiv turbogeneratoarelor. În tabloul nr. 2 sînt date valorile următorilor parametri în unități relative: reactanța de scăpări a circuitului indus ($x_s$) și a circuitului de excitație ($x_f$), reactanța corespunzătoare reacțiunii indusului pe axa longitudinală ($x_{ad}$) și reactanța sincronă longitudinală ($x_d$) pentru mașina cu poli aparenți și poli înecați.

*b*) Varierea întrefierului maşinii; în tabloul nr. 3 sînt date valorile aceloraşi parametri pentru două valori ale întrefierului: $\delta = 1{,}5$ mm şi $\delta = 1$ mm, în cazul maşinii cu poli aparenţi.

*c*) Construirea înfăşurării de amortizare demontabile, care să permită varierea parametrilor maşinii prin:

*Tabloul*

| | $U_n$ V | $\eta$ % | $\tau$ cm | l cm | $\delta$ mm | $B_\delta$ Wb/m² | $A$ A/cm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Hidrogenerator 27 000 kVA 2 $p = 40$ | 10 500 | 96,9 | 54,2 | 75 | 13 | 0,875 | 543 |
| Turbogenerator 31 250 kVA 2 $p = 2$ | 10 500 | 97 | 154 | 222 | 3 | 0,847 | 536 |
| Generator model cu poli înecaţi 12,5 kVA, 2 $p = 6$ | 230 | 86,2 | 17,3 | 19,5 | 0,85 | 0,56 | 98,5 |
| Generator model cu poli aparenţi 12,5 kVA, 2 $p = 6$ | 230 | 86,2 | 17,3 | 19,5 | 1 | 0,576 | 88 |
| Generator model cu poli înecaţi *) 12 kVA, 2 $p = 6$ | 400/231 | 82 | 26 | 17,7 | 0,85 | 0,517 | 48 |
| Generator model poli aparenţi *) 12 kVA, 2 $p = 6$ | 400/231 | 82,7 | 26 | 17,7 | 1,5 | 0,517 | 48 |

*) Proectate la Institutul de energetică al Academiei R.P.R.

— scurtcircuitarea barelor de amortizare prin inel de scurtcircuitare complet sau segmentat pe poli, realizarea deci a unei înfăşurări de amortizare în axa longitudinală şi transversală a maşinii sau numai în axa longitudinală;

— utilizarea unor bare de amortizare de dimensiuni deosebite: $17{,}5 \times 9{,}5$ mm², $14 \times 9{,}5$ mm², $10 \times 9{,}5$ mm², construite din acelaşi material sau din materiale deosebite;

— varierea numărului de bare amortizoare pe pol de la $1 \div 4$.

*Tabloul nr. 2*

| | $\underline{x}_s$ | $\underline{x}_f$ | $\underline{x}_{ad}$ | $\underline{x}_d$ |
|---|---|---|---|---|
| Maşini cu poli aparenţi . | 0,0978 | 0,08 | 0,695 | 0,7928 |
| Maşini cu poli înecaţi . . | 0,12 | 0,0552 | 1,42 | 1,538 |

*d*) Construirea înfăşurării statorice cu mai mulţi conductori în paralel şi scoaterea ambelor capete ale acestora la plăcile de borne ale maşinii; în acest mod se permite varierea numărului de conductori în paralel, dîndu-se posibilitatea încercării maşinii cu înfăşurări diferite, simetrice sau nesimetrice;

*e*) Executarea unor borne de intrare şi ieşire pentru înfăşurarea de excitaţie dispusă pe fiecare pol al maşinii, fapt care permite conectarea respectivelor porţiuni din înfăşurarea de excitaţie în serie sau în paralel.

Parametrii maşinii model pot fi variaţi de asemenea, dacă se acţionează asupra maşinii din exterior şi anume prin:

*a*) utilizarea unui volant suplimentar dispus pe acelaşi ax cu generatorul, ceea ce dă posibilitatea varierii constantei de inerţie $H_j$ a agregatului motor-generator,

*b*) conectarea în serie cu diferitele circuite electrice ale generatorului a unor reactanțe externe; dacă valorile parametrilor constructivi ai generatorului model sînt inferioare celor caracteristice generatoarelor de mare putere — lucru realizat în cazul de față — prin operația amintită, se dă posibilitatea variерii lui $x_s$, $x_f$, $x_d$ etc. în limite suficient de largi;

*nr. 1*

| $H_j$ s | $\underline{x}_d$ | $\underline{x}'_d$ | $\underline{x}_s$ | $\underline{x}_f$ | $r_a$ | $r_r$ | $T_{d0}$ s | $T'_d$ s | $T''_d$ s |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 9,1 | 1,14 | 0,29 | 0,129 | 0,19 | 0,0038 | 0,00075 | 5,1 | 1,56 | 0,35 |
| 9,9 | 1,99 | 0,23 | 0,077 | 0,16 | 0,0019 | 0,001 | 6 | 0,74 | 0,1 |
| 2,35 | 1,77 | 0,122 | 0,034 | 0,05 | 0,0172 | 0,0058 | 0,8 | 0,55 | 0,01 |
| 2,35 | 0,901 | 0,091 | 0,0041 | 0,515 | 0,0148 | 0,0027 | 1,07 | 0,108 | 0,04 |
| 6,5 | 1,538 | 0,173 | 0,12 | 0,055 | 0,00278 | 0,0018 | 2,6 | 0,293 | — |
| 5,6 | 0,793 | 0,1693 | 0,0978 | 0,08 | 0,00278 | 0,00115 | 2,14 | 0,458 | 0,13 |

*c*) utilizarea pentru compensarea rezistenței circuitului de excitație a generatorului serie de curent continuu; generatorul compensator, conectat în serie cu circuitul de excitație al mașinii urmează să îndeplinească

*Tabloul nr. 3*

| | $\underline{x}_s$ | $\underline{x}_f$ | $\underline{x}_{ad}$ | $\underline{x}_d$ |
|---|---|---|---|---|
| $\delta = 1{,}5$ mm | 0,0978 | 0,08 | 0,695 | 0,7928 |
| $\delta = 1$ mm | 0,0983 | 0,0863 | 0,78 | 0,8783 |

următoarele condiții: să posede o caracteristică de magnetizare liniară, să fie lipsit de magnetism remanent, să aibă un ciclu histerezis redus la minimum posibil, să posede perii de contact a căror rezistență să fie îndepedentă de intensitatea curentului ce le străbate, să-și păstreze proprietățile în cazul unor variații largi de tensiune, cum ar fi, de exemplu, acelea din cazul forțării excitației etc.; în cazul cînd aceste condiții sînt îndeplinite, micșorarea rezistenței circuitului de excitație de 2—3 ori poate fi făcută fără dificultăți și ca atare variația constantelor de timp $T_{d0}$, $T'_d$ se poate face în limite largi.

Față de cele semnalate mai sus este necesar să se sublinieze de asemenea importanța pe care o prezintă schimbarea puterii bază ($P_n$) a generatorului model pentru varierea tuturor parametrilor mașinii, fapt arătat la paragraful IV.

Rezultă, deci, că modelul realizat, constructiv își are parametrii apropiați de cei ai generatoarelor de mare putere și că prin diverse mijloace acești parametri pot fi variați în limite suficient de largi; în acest mod se oferă posibilitatea utilizării mașinii respective pentru cercetări multiple legate de funcționarea izolată sau în cadrul unui sistem energetic a generatoarelor sincrone de mare putere.

# ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

В работе затронуты некоторые общие стороны вопроса электродинамического моделирования электроэнергетических систем, причем особое внимание уделяется вопросу моделирования синхронных генераторов.

В первой части работы приводятся предварительные соображения и сведения, касающиеся использования математического прибора при физическом моделировании.

Затем авторы переходят к установлению критериев подобия в случае моделирования синхронного генератора, исходя из общих уравнений синхронной машины и применяя метод анализа уравнений; далее представлены практические перспективы, связанные с осуществлением моделей синхронных генераторов, и рассматриваются соотношения между функциональными параметрами и их геометрическими размерами.

В заключение представлена модель синхронного генератора, разработанного и спроэктированного в Энергетическом институте, с указанием значений параметров этой модели, а также возможностей их изменения.

# MODÈLES ÉLECTRODYNAMIQUES DES SYSTÈMES ÉLECTRO-ÉNERGÉTIQUES

## MODÉLAGE DES GÉNÉRATEURS SYNCHRONES

(RÉSUMÉ)

Le travail comprend quelques aspects généraux du problème du modélage électrodynamique des sytèmes électroénergétiques, l'accent portant sur le modélage des moteurs synchrones.

La première partie du travail contient des considérations préliminaires et des notions concernant l'emploi de l'appareil mathématique dans le modélage physique.

On établit ensuite les critériums de similitude dans le cas du modélage du générateur synchrone, en partant des équations générales de la machine synchrone et en appliquant la méthode de l'analyse des équations; on présente certains aspects d'ordre pratique, concernant la réalisation des modèles de générateurs synchrones et l'on analyse les relations entre les paramètres fonctionnels et leurs dimensions géométriques.

Pour conclure, on présente le générateur synchrone-modèle étudié et projeté à l'Institut d'Énergétique, en indiquant les valeurs des paramètres du générateur-modèle et les possibilités de varier ces paramètres.

## BIBLIOGRAFIE

1. V. A. Venikov, *Nekotorîe voprosî primeneniia podobiia pri modelirovanii elektriceskih sistem.* Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie tehniceskih nauk. 1954, nr. 1, p. 69.
2. V. L. Lossievski, *Primeneniie teorii podobiia i dinamicesckih analoghii k zadaceam modelirovaniia obiektov i protessov regulirovaniia.* Gosenergoizdat, Moscova, 1951.
3. V. A. Venikov, *Primenenie teorii podobia i fiziceskovo modelirovania v electrotehnike.* Gosenergoizdat, Moscova, 1949.
4. V. A. Venikov i A. V. Ivanov-Smolenski, *Razvitie fiziceskih modelei elektriceskih sistem.* Elektricestvo, 1955, nr. 8, p. 1.
5. M. P. Kostenko, *Electrodinamiceskaia model dlea issledovaniia ustoicivosti.* Elektricestvo, 1950, nr. 9. p. 5.
6. M. P. Kostenko i I. D. Uruşov, *Elektrodinamiceskie modeli ghidrogheneratorov Kuibîşevskoi GES.* Elektricestvo, 1955, nr. 8, p. 11.
7. V. A. Venikov i A. V. Ivanov-Smolenski, *Sinhronti ghenerator dlea elektrodinamiceskogo modelirovaniia elektriceskih sistem.* Elektricestvo, 1951, nr. 8, p. 19.
8. Fr. Cahen, *Les auxiliaires du calcul des réseaux électriques : modèles, analogues calculateurs.* Bulletin de la Société Française des Electriciens, martie 1954, p. 117.
9. R. Robert, *Le microréseau : modèles dinamiques des réseaux.* Bulletin de la Société Française des Electriciens, februarie 1954, p. 67.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 3, 1956

*ELECTOENERGETICĂ ŞI ELECTROTEHNICĂ*

# CONDIŢII LIMITĂ DE STABILITATE STATICĂ A SISTEMELOR ELECTROENERGETICE

DE

F. MANEA

## INTRODUCERE

Deşi pierderea stabilităţii statice a sistemelor electrice este un fenomen relativ rar întîlnit, este necesară o examinare atentă a problemei atît în timpul proiectării, cît şi în cursul exploatării centralelor şi reţelelor electrice datorită consecinţelor ample pe care le poate avea o avarie de această natură.

Calculul stabilităţii statice este un calcul al funcţionării în paralel a maşinilor sincrone sau al legăturii maşinilor generatoare cu cele receptoare sincrone şi asincrone în prezenţa eventuală a unor sarcini pasive. *Desprinderea* centralelor în paralel sau a sistemului receptor, cînd acesta este alcătuit din maşini sincrone sau asincrone importante, determină starea limită de funcţionare a sistemului. Cunoaşterea acestor stări limită este necesară pentru a se putea stabili coeficienţii de siguranţă ai funcţionării stabile a sistemului. Pentru sistemele de reglare automată, sensul adevărat al noţiunii de stabilitate a fost stabilit de A. M. Liapunov citat după [1].

Sistemul este stabil dacă, după ce a fost scos din starea de echilibru cu ajutorul unei cauze perturbatoare, revine la starea iniţială după încetarea acţiunii acestei cauze. În acest sens, stabilitatea funcţionării se analizează cu ajutorul ecuaţiei caracteristice a sistemului de ecuaţii diferenţiale rezultate în urma considerării efectului perturbator.

Pentru sistemele energetice, considerate ca sisteme automate, la analiza influenţei diverselor elemente se fac ipoteze de calcul simplificatoare, în sensul considerării drept constante a unor variabile, pentru reducerea numărului de mărimi variabile ale sistemului şi în sensul liniarizării variaţiei locale a anumitor funcţii ce intervin în determinarea stării sistemului energetic, pentru obţinerea unui sistem liniar de ecuaţii diferenţiale.

Se poate obține în felul acesta o informație asupra comportării *locale* a sistemului. Pentru obținerea stării limită vor trebui calculate succesiv regimuri de funcționare în condiții din ce în ce mai grele, impuse în raport cu parametrii variabili considerați. În calculele practice ale stabilității sistemelor, cu toate aceste simplificări, nu este utilizată analiza coeficienților ecuației caracteristice decît în cazuri cu totul particulare. Din studiul acestor cazuri particulare au rezultat diverse relații, care, generalizate, au condus la criterii practice de analiză a stabilității. Aceste criterii practice stabilite în ultimul timp pe această cale coincid cu criterii mai vechi stabilite pe baze mai simple ale limitelor de putere transmisă de generatorii sincroni, la receptorii ce conțin și mașini sincrone sau asincrone [2].

În cazul sistemelor complexe, ele se încadrează în criteriul general de analiză numai al termenului liber și al coeficientului termenului de grad cel mai mare al ecuației caracteristice.

În cele ce urmează, din analiza criteriilor practice mai importante ale stabilității statice, [3], [4] observăm că toate acestea, în condiții limită, rezultă din stări de minim sau maxim ale diferenței unor mărimi electrice și mecanice.

Pe baza acestei înterpretări unitare vom folosi metoda multiplicatorilor lui Lagrange pentru găsirea condițiilor de minim relativ ca stare limită a stabilității statice. Se va face legătura dintre condiția rezultată în acest fel cu criteriul general dat de sistemul ecuațiilor diferențiale ale efectului perturbator.

Vom acorda o atenție deosebită ipotezelor simplificatoare privind considerarea frecvenței drept mărime constantă.

## SISTEM RADIAL CU CONSUMATOR UNIC

Considerăm cazul (fig. 1), a trei generatori interconectați la barele unui consumator echivalent, avînd caracteristici statice de sarcină cunoscute.

Presupunem sistemul din punctul de vedere al perturbațiilor mici lipsit de regulatori de tensiune. Vom nota prin $E_1$, $E_2$, $E_3$ forțele electromotoare corespunzătoare curenților de excitație din caracteristica de mers în gol liniarizată; la curenți de excitație constanți, ele vor fi funcții numai de pulsația $\omega$ (în funcționarea staționară); $X_1$, $X_2$, $X_3$, reactanțele sincrone inclusiv reactanțele liniilor respective de legătură, considerate funcții de pulsația $\omega$; $P_1$, $P_2$, $P_3$ puterile mecanice la arborele mașinilor, funcții de pulsația $\omega$; $\delta_1$, $\delta_2$, $\delta_3$ unghiurile vectorilor reprezentativi ai forțelor electromotoare față de tensiunea $U$ a barei comune. $P_c$ și $Q_c$ sînt respectiv puterea activă și reactivă a consumatorului echivalent, funcție de tensiunea $U$ și pulsația $\omega$. Se neglijează rezistențele liniilor electrice de legătură, comparativ mult mai mici decît reactanțele sincrone ale generatorilor.

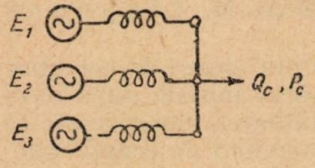


Fig. 1

Sistemul este determinat prin ecuațiile de echilibru ale puterilor active și reactive (1)

$$\left.\begin{aligned}
&a)\ \frac{E_1(\omega)}{X_1(\omega)}U\cos\delta_1+\frac{E_2(\omega)}{X_2(\omega)}U\cos\delta_2+\frac{E_3(\omega)}{X_3(\omega)}U\cos\delta_3-U^2\left[\frac{1}{X_1(\omega)}+\right.\\
&\qquad\left.+\frac{1}{X_2(\omega)}+\frac{1}{X_3(\omega)}\right]-Q_c(\omega,U)=0,\\
&b)\ \frac{E_1(\omega)}{X_1(\omega)}U\sin\delta_1+\frac{E_2(\omega)}{X_2(\omega)}U\sin\delta_2+\frac{E_3(\omega)}{X_3(\omega)}U\sin\delta_3-P_c(\omega,U)-0,\\
&c)\ \frac{E_1(\omega)}{X_1(\omega)}U\sin\delta_1-P_1(\omega)=0,\\
&d)\ \frac{E_2(\omega)}{X_2(\omega)}U\sin\delta_2-P_2(\omega)=0,\\
&e)\ \frac{E_3(\omega)}{X_3(\omega)}U\sin\delta_3-P_3(\omega)=0.
\end{aligned}\right\}\quad(1)$$

Aceste cinci ecuații au ca necunoscute $\delta_1$, $\delta_2$, $\delta_3$, $U$ și $\omega$.

Deoarece $\frac{E_i(\omega)}{X_i(\omega)}$ reprezintă curentul de scurtcircuit permanent la bare, vom nota acest raport prin $I_i(\omega)$.

Dacă vom analiza stabilitatea statică a unui generator va trebui să comparăm cuplul activ $C_m$ (mecanic) cu cel rezistent $C_e$ (electric), ca funcții de una din variabilele $\xi$ ale sistemului (1). Pentru aceasta vom elimina patru din cele cinci variabile între ecuațiile sistemului în vederea obținerii ecuației de echilibru staționar al cuplurilor la unul din generatori: $C_m(\xi)-C_e(\xi)=0$. Este preferabil să alegem ca variabilă una din mărimile de care depind direct (în mai mare măsură) cuplurile mecanic și electric pentru a avea o imagine mai clară a dependenței.

Ecuația de echilibru a cuplurilor determină, ca rădăcini ale sale, valori ale variabilei. Valorile de echilibru static stabil, după cum se știe, corespund cazurilor în care, dacă se consideră o abatere a variabilei, excesul de cuplu corespunzător tinde să micșoreze această abatere.

Pentru anumite valori ale mărimilor de stare impuse (curenți de excitație, impedanțe de sarcină, poziția ventilelor la turbină etc.), se poate ajunge în situația ca ecuația de echilibru a cuplurilor să aibă rădăcini duble. Valoarea variabilei corespunde, în acest caz, unei rădăcini a derivatei ecuației de echilibru a cuplurilor. Dacă soluția ecuației corespunde unui maxim sau minim excesul de cuplu va avea același semn, indiferent de semnul abaterii variabilei și deci va putea provoca amplificarea efectului perturbator. O mică variație în același sens a mărimilor de stare impuse va determina valori de stare discontinui (mult diferite de cele precedente) sau valori imaginare ale mărimilor rezultate conform ecuațiilor de stare. Fizic, va avea loc trecerea spre alt regim corespunzător unor alte ecuații decît cele presupuse, regim de ieșire din sincronism pentru mașina sincronă.

Condiția necesară de minim sau maxim a funcției reprezentînd ecuația de echilibru a cuplurilor (pentru valori ale variabilei care să satisfacă

ecuația de echilibru) este aceea, ca derivata funcției să se anuleze pentru aceleași valori ale variabilei.

În cazul nostru, va trebui să avem $\frac{d\,[C_m(\xi) - C_e(\xi)]}{d\xi} = 0$ pentru valori ale variabilei care satisfac ecuația : $C_m\,(\xi) - C_e\,(\xi) = 0$.

Se poate arăta ușor că dacă condiția de anulare a derivatei este satisfăcută pentru ecuația cuplurilor în funcționarea staționară la limită, ea este satisfăcută și pentru ecuația puterilor și reciproc.

Condiția anterioară de stare limită în funcționare a unei mașini sincrone rezultă în mod analog și pentru o mașină asincronă sau pentru un consumator complex, ce conține și mașini sincrone sau asincrone, pentru care caracteristicile statice de sarcină sînt cunoscute. Deoarece eliminarea unor variabile între ecuațiile de stare ale sistemului este dificilă, în vederea calculului derivatei totale a funcției de echilibru a cuplurilor sau puterilor, este preferabilă aplicarea unei metode de minim sau maxim *relativ*. În cazul ecuațiilor sistemului (1) aplicăm metoda multiplicatorilor lui L a g r a n g e, citat după [5], pentru determinarea condiției în care, de exemplu, funcția de conservare a puterii active la generatorul 1, $P_1(\omega) - I_1(\omega)\,U \sin \delta_1 = 0$, corespunde unei stări limită (minim relativ).

Notînd prin $Q(U, \omega)$ expresia $U^2\left[\frac{1}{X_1(\omega)} + \frac{1}{X_2(\omega)} + \frac{1}{X_3(\omega)}\right] + Q_c(U,\omega)$ și înmulțind prin multiplicatori $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$, ecuațiile (1) cu excepția funcției al cărei minim relativ se caută, formăm expresia (2)

$$\begin{aligned} F = {} & \lambda_1\,[I_1(\omega)U\cos\delta_1 + I_2(\omega)U\cos\delta_2 + I_3(\omega)\,U\cos\delta_3 - Q(\omega,U)] + \\ & + \lambda_2\,[I_1(\omega)U\sin\delta_1 + I_2(\omega)U\sin\delta_2 + I_3(\omega)\,U\sin\delta_3 - P_c(\omega,U)] + \\ & + P_1(\omega) - I_1(\omega)\,U\sin\delta_1 + \lambda_3\,[I_2(\omega)\,U\sin\delta_2 - P_2(\omega)] + \\ & + \lambda_4\,[I_3(\omega)U\sin\delta_3 - P_3(\omega)]. \end{aligned} \tag{2}$$

Anularea derivatelor parțiale ne conduce la sistemul (3)

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial U} &= \lambda_1[I_1\cos\delta_1 + I_2\cos\delta_2 + I_3\cos\delta_3 - Q'_u] + \lambda_2\,[I_1\sin\delta_1 + \\ &+ I_2\sin\delta_2 + I_3\sin\delta_3 - P'_{cu}] - I_1\sin\delta_1 + \lambda_3 I_2\sin\delta_2 + \\ &+ \lambda_4 I_3\sin\delta_3 = \lambda_1\left(\frac{Q}{U} - Q'_u\right) + \lambda_2\left(\frac{P_c}{U} - P'_{cu}\right) - \frac{P_1}{U} + \lambda_3\frac{P_2}{U} + \\ &+ \lambda_4\frac{P_3}{U} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \delta_1} &= -\lambda_1 I_1 U\sin\delta_1 + \lambda_2 I_1\,U\cos\delta_1 - I_1\,U\cos\delta_1 = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial \delta_2} &= -\lambda_1 I_2\,U\sin\delta_2 + \lambda_2 I_2\,U\cos\delta_2 + \lambda_3 I_2\,U\cos\delta_2 = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial \delta_3} &= -\lambda_1 I_3\,U\sin\delta_3 + \lambda_2 I_3 U\cos\delta_3 + \lambda_4 I_3 U\cos\delta_3 = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial \omega} &= \lambda_1 q'_\omega + \lambda_2 p'_\omega - p'_{1\omega} + \lambda_3 p'_{2\omega} + \lambda_4 p'_{3\omega} = 0. \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

În ultima ecuație s-au notat cu litere mici derivatele parțiale în raport cu $\omega$ ale coeficienților multiplicatorilor respectivi din expresia (2).

Eliminarea parametrilor $\lambda_i$ între ecuațiile sistemului (3) conduce la relația (4)

$$-[p'_{1\omega}\operatorname{tg}\delta_1 + p'_{2\omega}\operatorname{tg}\delta_2 + p'_{3\omega}\operatorname{tg}\delta_3 + q'_{\omega}]\frac{UP'_u}{p'_{1\omega}+p'_{2\omega}+p'_{3\omega}-p'_{\omega}} = P_1\operatorname{tg}\delta_1 + P_2\operatorname{tg}\delta_2 + P_3\operatorname{tg}\delta_3 + Q - Q'_u . \tag{4}$$

Ținînd seama de expresia lui $Q$ și $P_i$ prin transformări trigonometrice simple se obține (5)

$$\frac{I_1}{\cos\delta_1}+\frac{I_2}{\cos\delta_2}+\frac{I_3}{\cos\delta_3} = Q'_u + P'_u\frac{p'_{1\omega}\operatorname{tg}\delta_1 + p'_{2\omega}\operatorname{tg}\delta_2 + p'_{3\omega}\operatorname{tg}\delta_3 + q'_{\omega}}{p'_{\omega}-(p'_{1\omega}+p'_{2\omega}+p'_{3\omega})} . \tag{5}$$

Expresia astfel obținută din condiția de minim relativ al funcției de conservare a puterii active la generatorul 1 sau, cu alte cuvinte, de putere limită pentru generatorul respectiv este aceeași pentru oricare din generatori. Aceasta se poate observa fie din simetria expresiei (5), fie din considerațiile următoare : observăm că sistemul (3) este de forma (6)

$$\left.\begin{aligned} a_{11}\lambda_1 + a_{12}\lambda_2 + a_{13}\lambda_3 + a_{14}\lambda_4 + a_{15} &= 0\\ a_{21}\lambda_1 + a_{22}\lambda_2 + a_{23}\lambda_3 + a_{24}\lambda_4 + a_{25} &= 0\\ a_{31}\lambda_1 + a_{32}\lambda_2 + a_{33}\lambda_3 + a_{34}\lambda_4 + a_{35} &= 0\\ a_{41}\lambda_1 + a_{42}\lambda_2 + a_{43}\lambda_3 + a_{44}\lambda_4 + a_{45} &= 0\\ a_{51}\lambda_1 + a_{52}\lambda_2 + a_{53}\lambda_3 + a_{54}\lambda_4 + a_{55} &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

Se poate arăta ușor că eliminarea parametrilor $\lambda_i$ conduce la o relație identică cu cea obținută din anularea determinantului sistemului (6), adică din relația (7)

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15}\\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25}\\ - & - & - & - & -\\ - & - & - & - & -\\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{vmatrix} = 0 \tag{7}$$

Pe această cale se va obține relația căutată, sub o formă mai elegantă. Rezultă totodată că relația (5) corespunde unei stări limită în funcționarea sistemului energetic, conform ecuațiilor (1). Această relație nu determină însă sub formă explicită elementul sistemului (mașină sincronă sau asincronă) care condiționează starea limită.

Pentru mai multă sistematizare și eleganță vom scrie derivatele parțiale ale funcțiilor sistemului (1) sub forma tabloului nr. 1.

Considerînd tabloul nr. 1 drept determinant și anulîndu-l obținem prin transformări simple relația (5).

Observăm că, dacă simplificăm ecuațiile *a*) sau *b*) din sistemul (1) cu $U$, obținem aceeași condiție limită pe care o putem interpreta acum drept condiție limită de conservare staționară a componentelor de curent activ sau reactiv la consumator. La fel, dacă simplificăm ecuațiile *c*, *d* sau *e*, cu $\omega$ putem interpreta aceeași condiție limită (5) drept condiție

*Tabloul nr. 1*

| | *a* | *b* | *c* | *d* | *e* |
|---|---|---|---|---|---|
| $\frac{\partial}{\partial \delta_1}$ | $-I_1 U \sin \delta_1$ | $I_1 U \cos \delta_1$ | $I_1 U \cos \delta_1$ | 0 | 0 |
| $\frac{\partial}{\partial \delta_2}$ | $-I_2 U \sin \delta_2$ | $I_2 U \cos \delta_2$ | 0 | $I_2 U \cos \delta_2$ | 0 |
| $\frac{\partial}{\partial \delta_3}$ | $-I_3 U \sin \delta_3$ | $I_3 U \cos \delta_3$ | 0 | 0 | $I_3 U \cos \delta_3$ |
| $\frac{\partial}{\partial U}$ | $\frac{Q}{U} - Q'_u$ | $\frac{P_c}{U} - P'_{cu}$ | $\frac{P_1}{U}$ | $\frac{P_2}{U}$ | $\frac{P_3}{U}$ |
| $\frac{\partial}{\partial \omega}$ | $-q'_\omega$ | $-p'_\omega$ | $-p'_{1\omega}$ | $-p'_{2\omega}$ | $-p'_{3\omega}$ |

limită de echilibru staționar al cuplurilor la arborele mașinilor. Această ultimă intrerpretare are avantajul că redă fenomenul fizic mai clar, mai intuitiv. Dacă s-ar căuta ecuația caracteristică a sistemului de ecuații diferențiale, rezultate drept consecință a unui efect perturbator aplicat sistemului (1), aceasta s-ar obține din anularea unui determinant alcătuit pe baza unui tablou asemănător tabloului nr. 1 [6]. Spre deosebire de acesta, vor interveni în plus, adițional în unele căsuțe, funcții de derivate în raport cu timpul (sau în scrierea simbolică, de operatorul $p = \frac{d}{dt}$).

Ecuația caracteristică a sistemului liniar se obține ca polinom al puterii lui $p$. Dacă în determinantul care reprezintă ecuația caracteristică se consideră $p = 0$ (regim staționar), se obține chiar determinantul condiției de minim relativ, analizat anterior.

Deoarece, din ecuația caracteristică, dacă facem $p = 0$, se obține coeficientul termenului de grad zero, rezultă condiția de minim relativ drept aceeași cu anularea termenului liber din ecuația caracteristică. După cum se știe din criteriul lui Hurwitz citat după [1], aceasta este o condiție suficientă peutru limita de stabilitate. În cazul cînd coeficientul termenului în $p$, de gradul cel mai mare, nu-și schimbă semnul (ceea ce se întîmplă de obicei) înaintea schimbării semnului termenului liber, condiția de limită este și necesară, dacă se analizează numai proprietățile *elastice* ale sistemului (nu se ține seama de eventualele oscilații în sistem). În cazul mașinilor sincrone și asincrone interconectate, coeficientul termenului de gradul cel mai mare al ecuației caracteristice a micilor oscilații este determinat de mărimi constante specifice mașinilor

și deci nu-și schimbă semnul la schimbarea stării de regim a sistemului. De aceea, dezvoltările teoretice ale problemei stabilității statice de către I. M. Markovici și S. A. Sovalov [6], privind fixarea coordonatelor în vederea luării în considerație a posibilității schimbării semnului coeficientului termenului de gradul cel mai mare, nu reprezintă practic condiții necesare.

Condiția de minim relativ corespunde, ca și anularea termenului liber al ecuației caracteristice a micilor oscilații, cazului în care efectul perturbator este lent încît să nu intervină fenomene inerțiale, adică unui caz particular de analiză numai a proprietăților *elastice* ale sistemului. Ea poate fi luată drept bază în analiza diverselor premise, precum și în calculul practic al stabilității statice pentru determinarea coeficienților de siguranță.

## INFLUENȚA VARIAȚIEI FRECVENȚEI ASUPRA STĂRII LIMITĂ

Dacă vom scrie relația obținută anterior (5), sub o formă mai generală ca mai jos (8) și o vom considera, după cum s-a arătat mai înainte, drept condiție limită dată de anularea termenului liber al ecuației caracteristice, pe baza criteriului Neumark, citat după [1], se delimitează două domenii: unul stabil și altul nestabil.

$$-\sum_{1}^{n}\frac{I_i}{\cos\delta_i}+Q'_u+P'_{cu}\frac{\sum_{1}^{n}P'_{i\omega}\operatorname{tg}\delta_i+q'_\omega}{P'_\omega-\sum_{1}^{n}P'_{i\omega}}=0. \tag{8}$$

Se știe că pentru unghiuri $\delta_i$ de valori mici, sistemul este stabil. Rezultă deci pentru domeniul stabil inegalitatea (9)

$$\sum\frac{I_i}{\cos\delta_i}<Q'_u+P'_u\frac{\sum_{1}^{n}P'_{i\omega}.\operatorname{tg}\delta_i+q'_\omega}{P'_\omega-\sum_{1}^{n}P'_{i\omega}}. \tag{9}$$

Dacă vom exprima mai explicit derivatele în raport cu pulsația, ținînd seama de ecuațiile sistemului (1) se obține expresia (10)

$$\sum\frac{I_i}{\cos\delta_i}<Q'_u+P'_{cu}\frac{\sum_{1}^{n}\frac{UI'_{i\omega}-P'_{i\omega}.\sin\delta_i}{\cos\delta_i}Q'_\omega}{P'_{c\omega}-\sum_{1}^{n}P'_{i\omega}} \tag{10}$$

Deoarece derivatele $P'_{i\omega}$ și $Q'_\omega$ sînt în general negative, iar $P'_{c\omega}$ și $I'_{i\omega}$ pozitive, termenul ce conține derivate ale frecvenței va contribui la lărgirea domeniului de stabilitate. Neglijarea termenului ce conține variația frecvenței este deci acoperitoare (pesimistă), în general, în studiul stabilității statice. Influența sa depinde și de factorul $P'_{cu}$, efectul reglant al sarcinii active, care pentru consumatori alcătuiți din motoare sincrone și asincrone este foarte mic.

## CONDIȚIA STĂRII LIMITĂ LA FRECVENȚĂ CONSTANTĂ

Presupunem o schemă mai generală (fig. 2) cu doi sau mai mulți generatori echivalenți interconectați având și sarcini locale reprezentate prin impedanțe echivalente constante. Consumatorul principal din nodul central are caracteristici de sarcină activă și reactivă, funcții de tensiunea $U$, cunoscute. Dacă se cunosc forțele electromotoare și puterile mecanice

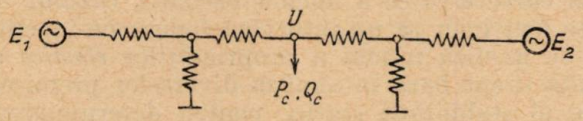



Fig. 2

ale mașinilor primare, considerarea frecvenței drept constantă, adică fixarea unei variabile, atrage în mod necesar eliminarea unei ecuații din sistemul de ecuații ce determină starea de funcționare a sistemului.

Astfel I. M. Marcovici [4], la aplicarea criteriului $\frac{dQ}{dU}$ nu mai ia în considerare caracteristica de putere activă a consumatorului din nodul principal.

Vom denumi caracteristica de sarcină în acest caz, *adaptabilă*, deoarece se presupune că sarcina se *adaptează* la caracteristica de putere generată în vederea menținerii unei frecvențe constante, neavînd o caracteristică de sarcină determinată proprie.

În mod analog P. S. Jdanov [3], la aplicara criteriului $\frac{dP_i}{d\delta_{ik}}$ presupune *adaptabilă* sarcina centralei receptoare $P_k$, aceasta fiind echivalent cu presupunerea unei caracteristici astatice de frecvență pentru centrala receptoare.

În cazul considerării drept caracteristică adaptabilă aceea a consumatorului activ din nodul principal, sistemul de ecuații ce determină starea de funcționare a interconexiunii (fig. 2) este

$$\left.\begin{aligned} a)\ P_1 &= \frac{E_1^2}{Z'_{11}}\sin\alpha'_{11} + \frac{E_1U}{Z_{1u}}\sin(\delta_1-\alpha_1),\\ b)\ P_2 &= \frac{E_2^2}{Z'_{22}}\sin\alpha'_{22} + \frac{E_2U}{Z_{2u}}\sin(\delta_2-\alpha_2),\end{aligned}\right\} \tag{11}$$

$$c)\ Q_c(u) = \frac{E_1U}{Z_{1u}}\cdot\cos(\delta_1+\alpha_1)+\frac{E_2U}{Z_{2u}}\cos(\delta_2+\alpha_2)-\frac{U^2}{Z_{11}}\cos\alpha_{11}-\frac{U^2}{Z_{22}}\cos\alpha_{22}.$$

Notăm prin

$$p_1 = P_1 - \frac{E_1^2}{Z'_{11}}\cdot\sin\alpha'_{11},$$

$$p_2 = P_2 - \frac{E_2^2}{Z'_{22}}\cdot\sin\alpha'_{22},$$

$$Q = Q_c(U) + \frac{U^2}{Z_{22}}\cdot\cos\alpha_{22} + \frac{U^2}{Z_{11}}\cos\alpha_{11}.$$

Anularea determinantului derivatelor parțiale conduce, după transformări trigonometrice simple, la expresia

$$\frac{I_1 \cos 2\alpha_1}{\cos(\delta_1 - \alpha_1)} + \frac{I_2 \cos 2\alpha_2}{\cos(\delta_2 - \alpha_2)} - Q_u' = 0. \tag{12}$$

În cazul considerării mai multor generatori se obține pentru domeniul stabil condiția

$$\sum \frac{I_i \cos 2\alpha_i}{\cos(\delta_i - \alpha_i)} < Q_u'. \tag{13}$$

Dacă am fi considerat ipotetic o caracteristică adaptabilă pentru puterea reactivă la consumator, în locul ecuației din sistemul (11) ar fi trebuit scrisă ecuația de conservare a puterii active (sau a componentei active a curentului)

$$P_c(U) = \frac{E_1 U}{Z_{1u}} \sin(\delta_1 + \alpha_1) + \frac{E_2 U}{Z_{2u}} \sin(\delta_2 + \alpha_2) - \frac{U^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} - \frac{U^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22}.$$

Condiția domeniului stabil se obține analog sub forma

$$\sum \frac{I_i \sin 2\alpha_i}{\cos(\delta_i - \alpha_i)} < P_u', \tag{14}$$

unde

$$P_u' = P_{cu}'(U) + 2U \sum \frac{\sin \alpha_{ii}}{Z_{ii}}.$$

Dacă se consideră drept ecuație $c$, în sistemul (11), cea de conservare a modulului curentului sau a puterii aparente, adică, $P_c^2 + Q_c^2 = P_g^2 + Q_g^2$ unde $P_g$ și $Q_g$ sînt expresiile puterii generate în nodul principal, se presupune deci prin ipoteză o caracteristică adaptabilă pentru faza curentului, sau $\frac{P_g}{Q_g} \equiv \frac{P_c}{Q_c}$, se obține condiția

$$Q \sum \frac{I_i \cos 2\alpha_i}{\cos(\delta_i - \alpha_i)} + P \sum \frac{I_i \sin 2\alpha_i}{\cos(\delta_i - \alpha_i)} < Q\, Q_u' + P\, P_u'. \tag{15}$$

Analog, presupunînd adaptabil modulul curentului sau al puterii aparente și deci scriind ecuația de conservare a fazei curentului, sau $\frac{P_g}{Q_g} = \frac{P_c}{Q_c}$, se obține analog relația

$$P \sum \frac{I_i \cos 2\alpha_i}{\cos(\delta_i - \alpha_i)} + Q \sum \frac{I_i \cos 2\alpha_i}{\cos(\delta_i - \alpha_i)} < P\, Q_u' + Q\, P_u'. \tag{16}$$

Este interesant de observat că, dacă sînt satisfăcute condițiile (13) și (14), cu atît mai mult vor fi satisfăcute (15) și (16), dacă $P$ și $Q$ sînt pozitivi. Cu alte cuvinte, condițiile (13) și (14) sînt suficiente pentru delimitarea domeniului stabil de funcționare în oricare din cele patru ipoteze simplificatoare considerate separat anterior.

Considerăm din nou cazul unei interconexiuni a trei generatori echivalenți, analog celor din figura 2. Dacă presupunem unul din generatori

ca avînd o caracteristică astatică de reglaj a frecvenței, de exemplu generatorul trei, ecuația de echilibru a puterii active pentru acesta devine o identitate și nu contribuie la determinarea stării de funcționare a sistemului. Acesta are deci o caracteristică *adaptabilă* de putere activă. Ecuațiile sistemului vor fi atunci

$$\begin{aligned}
&-p_1 + I_1 U \sin(\delta_1 - \alpha_1) = 0,\\
&-p_2 + I_2 U \sin(\delta_2 - \alpha_2) = 0,\\
&-P + I_1 U \sin(\delta_1+\alpha_1) + I_2 U \sin(\delta_2+\alpha_2) + I_3 U \sin(\delta_3+\alpha_3) = 0,\\
&-Q + I_1 U \cos(\delta_1+\alpha_1) + I_2 U \cos(\delta_2+\alpha_2) + I_3 U \cos(\delta_3+\alpha_3) = 0.
\end{aligned} \tag{17}$$

Anularea determinantului derivatelor parțiale ale sistemului respectiv conduce la relația (18) pentru domeniul stabil:

$$\frac{I_1 \cos 2\alpha_1}{\cos(\delta_1 - \alpha_1)} + \frac{I_2 \cos 2\alpha_2}{\cos_2(\delta - \alpha_2)} + \frac{I_3}{\cos(\delta_3 + \alpha_3)} < Q'_u + \tag{18}$$

$$+\left[P'_u - \frac{I_1 \sin 2\alpha_1}{\cos(\delta_1 - \alpha_1)} - \frac{I_2 \sin 2\alpha_2}{\cos(\delta_2 - \alpha_2)}\right] \times \operatorname{tg}(\delta_3 + \alpha_3).$$

Observăm de asemenea că satisfacerea relației (14) permite în mod acoperitor înlocuirea relației (18) prin (19) dacă $\operatorname{tg}(\delta_3 + \alpha_3) > 0$

$$\frac{I_1 \cos 2\alpha_1}{\cos(\delta_1 - \alpha_1)} + \frac{I_2 \cos 2\alpha_2}{\cos(\delta_2 - \alpha_2)} + \frac{I_3}{\cos(\delta_3 - \alpha_3)} < Q'_u + \frac{I_3 \sin 2\alpha_3}{\cos(\delta_3 - \alpha_3)} \operatorname{tg}(\delta_3+\alpha_3) \tag{19}$$

Se poate demonstra ușor că inegalitatea (19) este identică cu inegalitatea (13). Deci toate cazurile considerate anterior sînt incluse pentru domeniul stabil în relațiile (13) și (14).

Dacă dorim să studiem influența fiecărui element asupra stabilității sistemului și deci să putem ști care dintre mașini își pierde sincronismul sau se va desprinde mai întîi, vom scrie relațiile (13) și (14) sub o formă în care să apară grupați parametrii specifici ai fiecărei mașini

$$\sum\left[\frac{I_i \cos 2\alpha_i}{\cos(\delta_i - \alpha_i)} - 2U\frac{\cos\alpha_{ii}}{Z_{ii}}\right] < Q'_{cu}, \tag{20}$$

$$\sum\left[\frac{I_i \sin 2\alpha_i}{\cos(\delta_i - \alpha_i)} - 2U\frac{\sin\alpha_{ii}}{Z_{ii}}\right] < P'_{cu}. \tag{21}$$

Prin gruparea termenilor, ca în expresiile (20) și (21), se va putea observa ușor prin calcul care grup contribuie în mai mare măsură la nesatisfacerea egalității. Mașina corespunzătoare va fi nestabilă. Nestabilitatea celorlalte va putea fi o consecință în sensul că funcționarea unei mașini în regim nestabil (asincron sau de desprindere) poate să conducă (sau nu) la nestabilitatea altor mașini. Totodată, se vor putea compara ușor diversele mijloace de îmbunătățire a stabilității (repartiția sarcinilor active și reactive, micșorarea impedanțelor proprii și de legătură, ridicarea nivelului tensiunii) din punctul de vedere al eficacității lor.

Relațiile (20) și (21) mai au avantajul că, avînd o formă simplă, vor fi ușor de aplicat. Ele reprezintă relații acoperitoare (pesimiste), în sensul că satisfacerea lor atrage în mod necesar și satisfacerea altor relații corespunzătoare unor alte premise simplificatoare. Dacă vor indica stabilitate putem fi siguri de aceasta și pentru condițiile celorlalte relații, dacă vor indica instabilitate s-ar putea ca în condiții reale sistemul să fie totuși stabil.

Premisele simplificatoare, impuse în vederea fixării frecvenței, analizate anterior, conduc la relații de stare limită simple numai în cazul cînd generatorii sînt interconectați la barele consumatorului principal dat prin caracteristicile sale de sarcină.

În cazul unei interconexiuni a generatorilor înainte de nodul principal, vor trebui făcute alte ipoteze simplificatoare în vederea obținerii unor relații de stare limită simple.

Astfel, dacă vom analiza stabilitatea unui generator $E_1$ interconectat la nodul principal, în cazul cînd restul generatorilor (stabili) sînt inter-

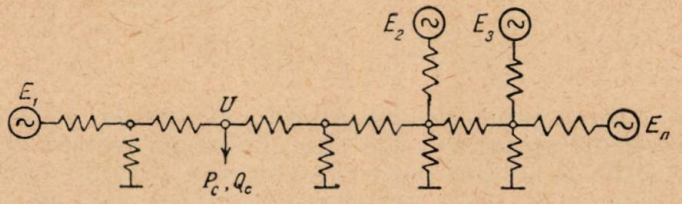



Fig. 3

conectați oricum (fig. 3) vom admite pentru aceștia din urmă unghiuri relative ale forțelor lor electromotoare constante.

Ecuațiile de stare le vom scrie sub forma

$$\left.\begin{aligned}
&1)\ I_1 U \sin(\delta_1 - \alpha_1) - P_1 = 0,\\
&2)\ \delta_2 - \delta_n = \delta_{2n},\\
&3)\ \delta_3 - \delta_n = \delta_{3n},\\
&\quad\ldots\ldots\ldots\\
&n-1)\ \delta_{n-1} - \delta_n = \delta_{n-1,n},\\
&n)\ \sum_1^n I_i U \sin(\delta_i + \alpha_i) - P = 0,\\
&n+1)\ \sum_1^n I_i U \cos(\delta_i + \alpha_i) - Q = 0.
\end{aligned}\right\} \qquad (22)$$

Ultimele două ecuații corespund echilibrului de puteri active și reactive la nodul principal de tensiune $U$.

$P$ și $Q$ sînt funcții de tensiunea $U$ și reprezintă puterile corespunzătoare impedanțelor echivalente privite din nodul principal (înspre generatoare), cărora li se aplică tensiunea $U$, inclusiv puterile consumatorului principal $P_c$ și $Q_c$.

Variabilele la perturbații sînt tensiunea $U$ și unghiurile de defazaj ale forțelor electromotoare față de această tensiune $(\delta_1 \ldots, \delta_n)$, în total $n+1$ ecuații cu $n+1$ variabile.

Folosind unele proprietăți ale determinanților, determinantul derivatelor parțiale ale sistemului este identic din punctul de vedere al limitei domeniului stabil cu determinantul de ordinul trei

$$\begin{vmatrix} I_1 U \cos(\delta_1 - \alpha_1) & I_1 U \cos(\delta_1 + \alpha_1) - I_1 U \sin(\delta_1 + \alpha_1) \\ 0 & \sum_2^n I_i U \cos(\delta_i + \alpha_i) - \sum_2^n I_i U \sin(\delta_i + \alpha_i) \\ \frac{P_1}{U} & \frac{P}{U} - P'_u \qquad\qquad \frac{Q}{U} - Q'_u \end{vmatrix} = 0. \quad (23)$$

Ținînd seama de ecuațiile sistemului (22), vom înlocui

$$\sum_1^n I_i U \cos(\delta_i + \alpha_i) = Q,$$

$$\sum_1^n I_i U \sin(\delta_i + \alpha_i) = P.$$

În acest caz se poate analiza comod stabilitatea generatorului $I_1$ la schimbări impuse parametrilor de stare ai acestuia (curent de excitație, deschidere ventile de admisie etc.), la schimbarea puterii consumatorului, sau a valorilor tensiunii, fără a fi necesar calculul regimului de funcționare pentru ceilalți generatori, studiind de fiecare dată numai semnul determinantului (23).

Analizînd termenii acestui determinant observăm că se poate defini un generator echivalent, de reglaj al frecvenței, determinat prin curentul său de scurt circuit $I$, unghi de defazaj al forței electromotoare $\delta$ și impedanță echivalentă privită dinspre nodul principal egală cu cea corespunzătoare tuturor generatorilor de echivalat în paralel. $I$ și $\delta$ se determină din ecuațiile

$$\begin{aligned} I \cos(\delta + \alpha) &= \sum_2^n I_i \cos(\delta_i + \alpha_i), \\ I \sin(\delta + \alpha) &= \sum_2^n I_i \sin(\delta_i + \alpha_i). \end{aligned} \quad (24)$$

Cu aceasta, condiția domeniului stabil se poate pune, prin dezvoltarea determinantului, sub forma

$$\frac{I_1 \cos 2\alpha_1}{\cos(\delta_1 - \alpha_1)} + \frac{I}{\cos(\delta + \alpha)} < Q'_u + P'_u \operatorname{tg}(\delta + \alpha). \quad (25)$$

Se observă că această expresie reprezintă un caz particular al relației (19).

Trebuie menționat că ipoteza unghiurilor relative (între forțele electromotoare ale unor mașini sincrone) constante sau, ceea ce este același lucru, a variațiilor egale ale unghiurilor unor forțe electromotoare față de una din forțele electromotoare este reală, atunci cînd generatorii funcți-

onează în condiții identice din punctul de vedere al reglajului frecvenței și al unghiurilor de defazaj față de tensiunea nodului central.

Înlocuirea unui sistem prin cel echivalent este mai corectă decît considerarea acelui sistem drept *bare infinite*, adică drept sistem de reglaj al frecvenței și tensiunii la valori constante.

Cînd se studiază stabilitatea a două mașini electrice reale sau echivalente, trebuie acordată o atenție deosebită considerației asupra reglajului frecvenței. Astfel, E. Clarke [7], studiind cazul a două mașini electrice, generator-motor, interconectate, ca în figura 4 *a*, introduce impedanțele de sarcină locală în impedanțele interne ale unor mașini echivalente, neținînd seama de mașina care reglează frecvența în studiul stabilității interconexiunii.

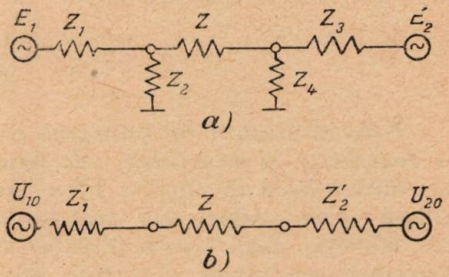



Fig. 4

Mașina $E_1$ împreună cu impedanțele $Z_1$ și $Z_2$ determină o mașină echivalentă de forță electromotoare $\dot{U}_{10} = \frac{\dot{E}_1 \cdot \dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}$ și de impedanța interioară $\dot{Z}_1' = \frac{\dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2}$. La fel pentru $E_2$ și $Z_3$, $Z_4$ se determină $\dot{U}_{20} = \frac{\dot{E}_2 \cdot \dot{Z}_3}{\dot{Z}_3 + \dot{Z}_4}$. Cu aceasta se obține o schemă mai simplă (fig. 4,*b*).

Relațiile anterioare, deși deduse pe altă cale [7], corespund teoremei lui Thévenin, care după cum se știe redă corect numai comportarea exterioară a „generatorului echivalent". În consecință, transformările indicate sînt corecte numai în ceea ce privește curenții, tensiunile și puterile impedanței $Z$. Schema echivalentă din figura 4 *b* nu redă corect funcționarea mașinilor interconectate.

Astfel, dacă $E_1$ este generator (deci impune frecvența), iar $E_2$ este motor, instabilitatea interconexiunii trebuie căutată ca instabilitate a motorului și deci simplificarea schemei trebuie făcută prin alcătuirea generatorului echivalent forței electromotoare $E_1$ și impedanțelor $Z_1$, $Z_2$, $Z$ și $Z_4$, încît să fie redată corect comportarea exterioară referitoare la impedanța $Z_3$ și la forța electromotoare $E_2$. Analog, dacă $E_2$ este o mașină echivalentă a unui sistem, în raport cu care se studiază stabilitatea mașinii $E_1$, echivalența trebuie făcută pentru $E_2$ și $Z_3$, $Z_4$, $Z$ și $Z_2$ pentru a se reda corect comportarea exterioară prin $Z_1$ față de $E_1$.

Anterior s-a analizat stabilitatea interconexiunii unei mașini sincrone cu un sistem echivalent și un consumator dat prin caracteristicile sale de sarcină. Dacă generatorii funcționează în condiții puțin diferite,ca defazaje ale forțelor electromotoare față de tensiunea nodului principal, poate fi probabilă instabilitatea sarcinii asincrone înaintea instabilității unui generator sincron. În acest caz, considerînd pentru toți generatorii ecuații de forma $\delta_i - \delta_n = \delta_{in} = \text{const.}$ (la o perturbație aplicată consumatorului în condiții limită) și scriind ecuațiile de echilibru ale sarcinilor active și reactive la nodul principal se vor obține ecuațiile de stare analoge sistemului (22) (cu excepția primei ecuații).

Determinantul corespunzător condiției limită se obține în acest caz într-o formă foarte simplă, ca determinant de ordinul doi, indiferent de numărul și modul de interconexiune al generatorilor

$$\begin{vmatrix} Q & -P \\ P - UP' & Q - UQ' \end{vmatrix} = P(P - UP') + Q(Q - UQ') = 0. \qquad (26)$$

Sau, pentru domeniul stabil

$$\frac{P}{Q} < \frac{U\,Q' - Q}{P - U\,P'}. \qquad (26')$$

Este interesant de remarcat că, dacă toți consumatorii se comportă ca rezistențe și reactanțe, nu există soluții reale ale acestora care să satisfacă relația de limită. Fizic, nu vom avea niciodată instabilitate, pentru orice valori ale rezistențelor și reactanțelor consumatorului. Într-adevăr, dacă sistemul tuturor generatorilor are o comportare de generator echivalent unic față de un receptor alcătuit din rezistențe și reactanțe, în cazul acesta nu poate fi vorba de instabilitate. Puterea maximă transmisă la receptor, nu corespunde puterii limită în funcționarea stabilă.

În cazul motorului asincron, la care cuplul rezistent este constant și deci $P_c$ la bornele rezistenței echivalente este constant, puterea maximă transmisă rotorului coincide cu puterea limită de desprindere. Dacă motorul asincron este alimentat printr-o linie electrică ce conține și rezistență și dacă în paralel sînt alimentați și alți consumatori (motoare asincrone sau impedanțe) oricare ar fi legea de variație cu viteza cuplului rezistent puterea limită în funcționarea stabilă va fi dată de limita unei expresii de forma $P_e - P_c = 0$, unde $P_e$ este puterea electrică primită, iar $P_c$ este puterea trimisă spre receptori (determinată de caracteristicile proprii ale acestora) în orice secțiune a rețelei.

Într-adevăr, expresiei $P_e - P_c = 0$ îi putem aduna și scădea simultan o funcție arbitrară $P_a$, încît expresia $(P_e + P_a) - (P_c + P_a)$ nu diferă decît formal de cea precedentă. Ea corespunde stării limită căutată într-o altă secțiune a rețelei, care diferă de precedenta din punctul de vedere al puterii prin valoarea $P_a$ ce poate aparține unor consumatori serie și paralel.

În consecință, caracteristicile statice de sarcină pot fi folosite, indiferent pentru ce secțiune a rețelei sînt date, în vederea studiului stabilității. Dacă ele aparțin mai multor elemente în paralel, pentru a determina și elementul (mașină) nestabil vor trebui cunoscute caracteristicile proprii ale tuturor elementelor.

Metodele anterioare de scriere a ecuațiilor de stare și analiză a stabilității permit ușor o generalizare numai în ceea ce privește num rul generatorilor interconectați oricum (inclusiv buclat), ce debitează la consumatorul principal determinat prin caracteristicile sale de sarcină activă și reactivă. Pentru consumatorii intermediari s-au considerat impedanțe echivalente constante.

Spre a putea obține o generalizare a metodei de analiză pentru mai mulți consumatori, de caracteristici statice date și generatori interconec-

taţi oricum, vom scrie ecuaţiile sistemului din figura 2 sub forma

$$\left.\begin{aligned}
P_1 &= \frac{E_1^2}{Z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_1 E_2}{Z_{12}} \sin (\delta_{12} - \alpha_{12}) + \frac{E_1 U_a}{Z_{1a}} \sin (\delta_{1a} - \alpha_{1a}) \\
P_2 &= \frac{E_2 E_1}{Z_{21}} \sin (\delta_{21} - \alpha_{21}) + \frac{E_2^2}{Z_{22}} \sin \alpha_{22} + \frac{E_2 U_a}{Z_{2a}} \sin (\delta_{2a} - \alpha_{2a}) \\
P_a &= \frac{U_a E_1}{Z_{a1}} \sin (\delta_{a1} - \alpha_{a1}) + \frac{U_a E_2}{Z_{a2}} \sin (\delta_{a2} - \alpha_{a2}) + \frac{U_a^2}{Z_{aa}} \sin \alpha_{aa} \\
Q_{a1} &= \frac{U_a E_1}{Z_{a1}} \cos (\delta_{a1} - \alpha_{a1}) + \frac{U_a E_2}{Z_{a2}} \cos (\delta_{a2} - \alpha_{a2}) - \frac{U_a^2}{Z_{aa}} \cos \alpha_{aa}
\end{aligned}\right\} \quad (27)$$

În felul acesta se consideră formal tensiunile nodurilor în care există consumatori daţi prin caracteristici statice, drept forţe electromotoare variabile ale unor maşini electrice, ale căror puteri active şi reactive sînt funcţii cunoscute (chiar caracteristicile statice date). Diferenţiind sistemul (27) în raport cu variabilele $\delta_{jk}$ şi $U_a$ se obţine un sistem de forma [8]

$$\left.\begin{aligned}
\text{I} \quad 0 &= K_{12} \cdot d\delta_{12} + K_{1a} \cdot d\delta_{1a} + H_{1a} \frac{dU_a}{U_a} \\
\text{II} \quad 0 &= -K_{21} \cdot d\delta_{12} + K_{2a} \cdot d\delta_{2a} + H_{2a} \cdot \frac{dU_a}{U_a} \\
\text{III} \quad 0 &= -K_{a1} \cdot d\delta_{1a} - K_{a2} \cdot d\delta_{2a} + A_a \frac{dU_a}{U_a} \\
\text{IV} \quad 0 &= H_{a1}\, d\delta_{1a} + H_{a2}\, d\delta_{2a} + B_a \frac{dU_a}{U_a} .
\end{aligned}\right\} \quad (28)$$

Considerînd $P_2$ debitat de o centrală de reglaj ideal al frecvenţei şi scriind $\delta_{12} = \delta_{1a} - \delta_{2a}$ obţinem tabloul nr. 2 corespunzător stării limită.

*Tabloul nr. 2*

| | $d\delta_{1a}$ | $d\delta_{2a}$ | $dU_a$ |
|---|---|---|---|
| I | $K_{12} + K_{1a}$ | $-K_{12}$ | $H_{1a}$ |
| III | $-K_{a1}$ | $-K_{a2}$ | $A_a$ |
| IV | $H_{a1}$ | $H_{a2}$ | $B_a$ |

Dacă se presupune $P_1$ ca avînd o caracteristică „adaptabilă", adică generatorul respectiv de reglaj al frecvenţei, ecuaţia I din (28) nu se ia în considerare, iar determinantul de stare rezultă din tabloul nr. 3.

Determinanții tablourilor nr. 2 și 3 se pot obține și cu ajutorul calculului puterii sincronizante $\frac{dP_1}{d\delta_{12}}$, $\frac{dP_2}{d\delta_{21}}$, ce determină unul din cele mai utilizate criterii practice ale stabilității sistemelor complexe [8].

*Tabloul nr. 3*

| | $d\delta_{1a}$ | $d\delta_{2a}$ | $dU_a$ |
|---|---|---|---|
| II | $-K_{21}$ | $K_{2a}+K_{21}$ | $H_{2a}$ |
| III | $-K_{a1}$ | $-K_{a2}$ | $A_a$ |
| IV | $-H_{a1}$ | $H_{a2}$ | $B_a$ |

Ei corespund anulării puterii sincronizante, deci condiției limită în funcționarea stabilă a sistemului.

## CONCLUZII

1) Criteriile practice de analiză a proprietăților „elastice" ale sistemelor energetice, în condiții limită, pot fi interpretate unitar ca expresii de minim relativ al unor funcții ce intervin în determinarea stării de funcționare a sistemului (puteri, curenți, momente).

2) Starea limită de minim relativ corespunde anulării termenului liber din ecuația caracteristică de analiză a comportării locale a sistemului la studiul stabilității în sens Liapunov.

3) Neglijarea variației frecvenței necesită adoptarea unor condiții ipotetice de funcționare ce simplifică mult studiul. În raport cu premisele simplificatoare considerate, rezultă stări limită diferite.

4) Toate criteriile practice sînt concordante, adică determină aceeași stare limită, dacă premisele adoptate în calcul sînt aceleași.

5) Considerarea stabilității sistemelor electrice, ca aceea a generatorilor sau sarcinii, este mai puțin specifică ; mai corect, ar trebui considerată sub aspectul stabilității mașinilor sincrone și asincrone. Mașinile sincrone cu unghiuri interne $\delta$ mari și unghiuri $\alpha$ (complementare ale unghiurilor de impedanță reciprocă), mici la generatori și mari la motor, au cea mai mare influență asupra condiției de limită a domeniului stabil. Modificarea parametrilor impuși acestora este mai sensibilă decît aceea a celorlalte mașini. Instabilitatea va fi a mașinilor sincrone cu unghiuri $\delta$ mari dacă mașinile asincrone sînt stabile.

Stabilitatea mașinilor asincrone se studiază simplu în ipoteza simplificatoare a mașinilor sincrone echivalente. Asocierea criteriului $\frac{dQ}{dU}$ stabilității sarcinii nu este suficient de justificată.

6) Deoarece ipotezele simplificatoare, rezultate din neglijarea variației frecvenței, introduc erori diferite, este bine ca analiza stabilității

statice a sistemelor să se facă în ipoteze de calcul acoperitoare, dar apropiate de condițiile reale de funcționare. Utilizarea relațiilor de limită stabilite în considerațiile anterioare permite ușor compararea aplicării diferitelor ipoteze în studiul stabilității sistemelor.

7) În cazul cel mai general al sistemelor complexe utilizarea metodei propuse permite mai ușor stabilirea determinantului din care rezultă starea limită, în ipoteza reglajului frecvenței, decît găsirea expresiei puterii sincronizante.

### NOTAȚII PRINCIPALE

$E_i$ — forță electromotoare;

$\delta_i$, $\delta_{ia}$, $\delta_{ik}$ — defazajul forței electromotoare complexe $\dot{E}_i$ respectiv față de tensiunea $\dot{U}$, $\dot{U}_a$ sau față de forța electromotoare $\dot{E}_k$;

$P, P_c, P_g, P_i$ — puteri active respectiv, în general, consumată, generată sau a unei mașini sincrone oarecare;

$Q, Q_c, Q_g, Q_i$ — puteri reactive corespunzătoare;

$\omega$ — pulsația;

$X_i$ — reactanță;

$Z'_{ii}$, $Z_{ii}$ sau $Z_{aa}$ — impedanțe proprii;

$Z_{iu}$ - $Z_{ui}$, $Z_{ia}$ — $Z_{ai}$ — impedanțe de transfer (mutuale, reciproce sau de legătură);

$\alpha'_{ii}$, $\alpha_{ii}$, $\alpha_{aa}$ — unghiuri complementare ale argumentelor impedanțelor complexe proprii ($Z_{ii}$, $Z_{ii}$, $Z_{aa}$);

$\alpha_{iu}$ sau $\alpha_i$; $\alpha_{ia}$ — unghiuri complementare ale argumentelor impedanțelor complexe reciproce ($Z'_{iu}$, $Z_{ia}$);

$I_i$ — curent de scurt circuit permanent $\left(\frac{E_i}{Z_{iu}}\right)$;

$P'_{cu}$, $Q'_{cu}$ — derivate ale puterilor consumatorului în raport cu tensiunea (efectul reglant de tensiune al sarcinii);

$P'_{c\omega}$, $Q'_{c\omega}$ — derivate ale puterilor consumatorului în raport cu pulsația (efectul reglant de frecvență al sarcinii).

## ПРЕДЕЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Все практические критерии анализа статической устойчивости могут быть истолкованы в предельных условиях электроэнергетической системы как критерии состояния, соответствующего минимуму (или максимуму) разницы электрических и механических величин, какими являются моменты, мощности, токи.

На основе этого единого истолкования используется метод мультипликаторов Лагранжа для нахождения условия относительного минимума, соответствующего предельному состоянию статической устойчивости. Условие, найденное этим путем, тождественно условию, выведенному из общего кри-

терия анализа коэффициентов дифференциального уравнения малых колебаний. Оно служит для исследования свободного члена характеристического уравнения.

Анализируется влияние изменения частоты в простом случае.

Особое внимание уделяется упрощающим предположеням, касающимся установления частоты. Получаются простые выражения, которые могут быть использованы при проверке статической устойчивости электроэнергетических систем.

## CONDITIONS-LIMITE DE STABILITÉ STATIQUE DES SYSTÈMES ÉLECTROÉNERGÉTIQUES

(RÉSUMÉ)

On fait remarquer que tous les critériums pratiques d'analyse de la stabilité statique peuvent être interprétés dans des conditions-limite du système électroénergetique comme des critériums d'état correspondant au minimum (ou au maximum) de la différence de grandeurs électriques et mécaniques : moments, puissance, courants.

En vertu de cette interprétation unitaire, on fait usage de la méthode des multiplicateurs de Lagrange pour trouver la condition de minimum relatif correspondant à l'état limite de stabilité statique. La condition résultant par cette voie est identique à celle déduite du critérium général de l'analyse des coefficients de l'équation différentielle des petites oscillations. Elle correspond à l'étude du terme libre de l'équation caractéristique.

On analyse l'influence de la variation de la fréquence dans un cas simple.

On accorde une attention particulière aux hypothèses simplificatrices concernant la fixation de la fréquence. Il en résulte des expressions simples qui peuvent être utilisées pour vérifier la stabilité statique des systèmes électroénergetiques.

BIBLIOGRAFIE

1. M. V. Meerov, *Bazele reglării automate a mașinilor electrice*. Ed. energetică de stat, București, 1954.
2. H. Rissik, *Power System Interconenctions*. Londra, 1950.
3. P. S. Jdanov, *Stabilitatea sistemelor electrice*. Ed. energetică de stat, București, 1952.
4. I. M. Markovici, *Energheticeschie sistemî i ih rejimî*. Gosenergoizdat, Moscova, 1952.
5. V. I. Smirnov, *Curs de matematici superioare*. Ed. tehnică, București, 1953, vol. I.
6. I. M. Markovici, S. A. Sovalov *O prakticeskih kriteriah staticeskoi ustoicivosti*. Electrices stvo, 1945, nr. 3.
7. E. Clarke, *Steady State Stability in Transmision Systems*. Transactions AIEE, 1926, p. 22.
8. S. B. Crary, *Power System Stablility*. New York, 1947.
9. P. Dimo, *O cale nouă pentru aprecierea stabilității sistemelor energetice*. Studii și cercetări de energetică, t. V, nr. 1—2, 1955, p. 121.
10. F. Manea, *Studiul comparativ al unei noi căi de apreciere a stabilității statice a sistemelor electrice*. Studii și cercetări de energetică, t. V, nr. 3—4, 1955, p. 423.

# KILONUMĂRUL, UNITATE DE RAPORTARE A CONSUMULUI DE ENERGIE ELECRICĂ ÎN FILATURILE DE BUMBAC

DE

T. MICLESCU și S. MANEA

## I. Generalități

În industria textilă și anume în filaturi, s-a ales pentru exprimarea producției realizate unitatea numită kilonumăr (kN) sau multiplul acestuia (tN) tonanumăr (1 tonănumăr = $10^3$ kN).

Kilonumărul reprezintă din punct de vedere dimensional o lungime și este de fapt un kilometru dintr-un fir de o finețe anumită. Coeficientul de trecere între producția exprimată în kilograme și producția exprimată în kilonumere poartă numele de numărul firului. El arată câți kilometri de fir de finețea dată se găsesc într-un kilogram de fir de aceeași finețe. Conform celor spuse mai sus, relația de trecere de la kilogram la kilonumăr este

$$A\ (\text{kN}) = G\ (\text{kg}) \times N \left(\frac{\text{km}}{\text{kg}}\right).$$

Tonanumăr, conform aceleiași relații, se va determina cu formula

$$A\ (\text{tN}) = G\ (\text{kg}) \times N \left(\frac{\text{km}}{\text{kg}}\right) 10^{-3}.$$

Cum este comod a păstra numărul firului și într-un caz și în celălalt, pentru a căpăta direct producția în tonenumăr, se introduce în formulă greutatea în tone ; aceasta motivează și denumirea unității

$$A\ (\text{tN}) = G\ (t) \times N \left(\frac{\text{km}}{\text{t}}\right).$$

O tonănumăr reprezintă 1 000 km de fir.

Kilonumărul sau tonanumărul, folosite ca unități de măsură pentru producția de fire, se găsesc în mod curent utilizate și ca unități la care se raportează consumul de energie electrică în filaturi. Desigur că folosirea unei aceleiași unități pentru măsurarea, producției și pentru exprimarea consumului specific de energie electrică este comodă deoarece simplifică evidența întreprinderii. S-a pus întrebarea dacă acest lucru este justificat și din punct de vedere energetic și ar putea servi ca bază pentru stabilirea științifică a normei de consum de energie elec-

trică în filaturi. În această privinţă trebuie observat că în literatura de specialitate se găsesc puţine indicaţii care să arate dacă şi de ce este justificată alegerea kilonumărului ca unitate de raportare pentru consumul de energie electrică.

În afară de aceasta, chiar consumurile specifice de energie electrică găsite în literatură, în general date orientativ, diferă mult între ele, astfel încît lasă să se înţeleagă că s-au avut în vedere numai anumite sectoare de producţie din filaturi.

S-a impus atunci necesitatea de a găsi care sînt sectoarele din filatură pentru care este justificată, din punct de vedere energetic, raportarea consumului de energie electrică la kilonumăr.

Pentru a răspunde acestor întrebări au fost prelucrate o serie de date statistice şi s-au făcut ridicările experimentale necesare. În prelucrarea datelor, atît a celor experimentale cît şi a celor statistice, s-au folosit cîteva observaţii făcute asupra caracteristicilor energetice ale unei filaturi importante de bumbac din ţară.

Înainte de a trece la explicarea caracteristicilor este necesar să se facă o scurtă expunere a procesului tehnologic dintr-o filatură de bumbac.

## II. Scurtă expunere asupra schemei tehnologice a unei filaturi de bumbac

Procesul tehnologic al torsului într-o filatură de bumbac cardat se desfăşoară în următoarele secţii :

1) Secţia de curăţire (bataj), unde bumbacul brut suferă următoarele operaţii :

— curăţire de impurităţi şi de o parte din fibrele scurte ;

— amestecare pentru omogenizare ;

— aerisire şi umezire pentru recăpătarea elasticităţii normale ;

— presare într-o pătură care are o anumită greutate pentru o lungime dată (un anumit număr).

2) Secţia de preparaţie, unde se fac trei operaţii importante :

— operaţia de dărăcire sau de cardare care transformă pătura venită de la bataj într-o panglică sau bandă. Materialul este destrămat intens pînă la individualizarea fibrelor, curăţit de impurităţi şi scuturat de fibre scurte ;

— operaţia de reunire şi întindere a panglicilor provenind de la carde, pentru omogenizarea lor şi pentru paralelizarea fibrelor ;

— operaţia de tors preliminar care are scopul de a subţia panglicile ieşite de la maşina de laminat.

După această secţie semitortul obţinut este de cîteva numere.

3) Secţia de tors (ring), unde maşina finală de tors — ringul — realizează o ultimă întindere a semitortului şi anume o întindere mare, o toarcere puternică, ireversibilă, care să asigure rezistenţa şi omogenitatea firului în sensul secţiunii sale, şi îndesarea fibrelor din diferite secţiuni ale firului. În această secţie dintr-un semitort de o grosime oarecare se obţin cîteva numere de finete apropiată.

4) Secţia de finisaj, unde se fac următoarele operaţii :

— depănarea ;

— dublarea şi răsucirea ;

— pîrlirea ;

— formarea sculurilor ;

— mercerizarea firelor ;

— împachetarea ţevilor sau bobinelor.

Pentru obţinerea de fire cu finete mai mare, din bumbac de calitate superioară, se folosesc maşini speciale de pieptănat (filatură de bumbac pieptănat). Pînă la maşina bătătoare inclusiv,

fazele de lucru sînt aceleași. La carde se insistă mai mult asupra procesului și se dă o atenție mare ascuțirii regulate a garniturilor și unei curățiri repetate. După cardare materialul trece la mașina de reunit benzi. De aici trece la mașina de laminat, unde materialul este trecut printr-un tren de laminaj și se obține o nouă pătură. Urmează pieptănatul unde se separă impuritățile și fibrele scurte. Celelalte faze sînt la fel ca pentru filatura de bumbac cu carde. Dăm mai jos schema tehnologică a unei filaturi de bumbac, arătîndu-se cum variază numărul firului în diferite secții.

| Secția / Sortul | Bataj | Carde | Pieptănat | Laminor | Fleyer gros | Fleyer mijlociu cu rastel | Fleyer mijlociu de mare întindere | Fleyer fin cu rastel | Ring |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pieptănat | N<br>0,0027 | N<br>0,27 | N<br>0,27 | N<br>0,29 | N<br>1,4 | N<br>3,8 | | N<br>12 | N<br>60<br>70<br>85<br>100 |
| Cardat | N<br>0,0027 | N<br>0,27 | | N<br>0,29 | | | N<br>5 | | N<br>34<br>40<br>50<br>54 |

### III. Caracteristicile energetice ale agregatelor dintr-o filatură de bumbac

Pentru o mai ușoară înțelegere a celor ce urmează, se amintește pe scurt explicarea caracteristicilor energetice ale agregatelor cu diferite regimuri de funcționare [1].

În cazul agregatelor cu caracteristici energetice *) liniare, pentru diferite regimuri de funcționare, acestea acoperă suprafața unui triunghiu $OP_xP_{max}$. după cum se vede în figura 1. Dreapta $P_x$ $P_{max}$, corespunde lucrului continuu al agregatului la o valoare variabilă pentru productivitate ($A$).

Dreptele paralele cu dreapta $P_xP_{max}$ corespund lucrului agregatului pentru diverse valori ale duratei relative de funcționare $\beta$ $\left(\beta = \frac{T_m}{T_0}\right.$, unde $T_m$ este durata conectării utilajului, iar $T_0$ este fondul total de timp$\left.\right)$.

Fasciculul de drepte ce pleacă din origine, asemănător dreptei $OP_{max}$, reprezintă caracteristicile energetice pentru funcționarea agregatului cu o productivitate momentană constantă.

Coeficientul unghiular al dreptei este consumul specific de energie în cazul funcționării agregatului cu productivitatea momentană dată.

Menționăm că și pentru agregatul cu caracteristici neliniare(concave sau convexe) caracteristicile rămîn cele de mai sus, dacă se au în vedere numai regimurile de funcționare în care alternează perioadele de mers în gol cu perioadele de funcționare în sarcină constantă, egală

*) Caracteristicile energetice sînt curbele care reprezintă dependența dintre consumul de combustibil sau de energie și volumul producției într-o unitate de timp.

cu cea maximă, sau regimurile în care alternează perioade de sarcină constantă şi de întrerupere.

În figura 2 sînt date caracteristicile energetice pentru agregatele care funcţionează alternativ cu perioade de lucru util la încărcări constante, şi cu perioade de oprire, lipsind complet perioadele de mers în gol.

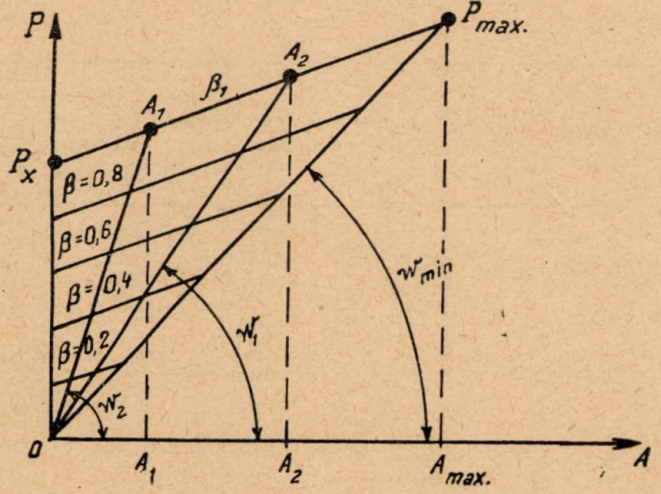



Fig. 1

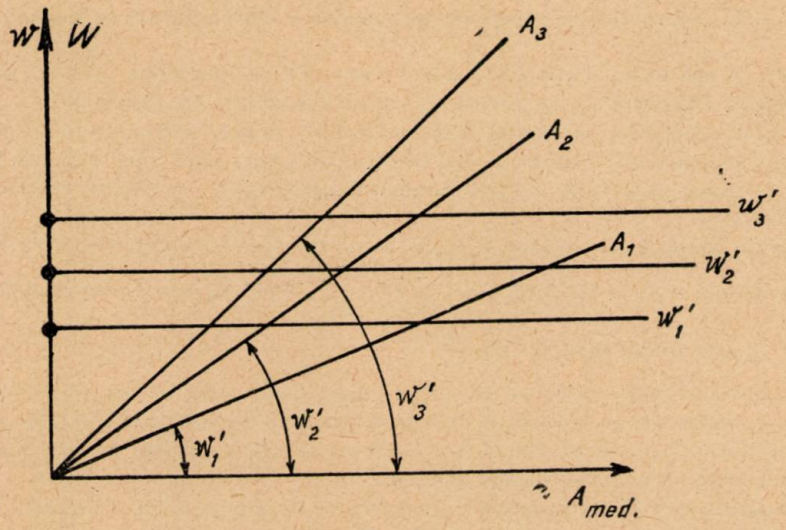



Fig. 2

Menţionăm faptul că aceste caracteristici sînt trasate pentru o productivitate momentană, constantă, iar în abscisă se trec productivităţile medii înregistrate în perioada de timp calendaristică aleasă. (zi, săptămînă sau lună). Înclinarea dreptei este în funcţie tot de consumul specific

corespunzător productivității momentane, el rămînînd constant pentru orice valoare a productivității medii.

Agregatele din sectoarele de producție ale unei filaturi (bataj, carde, pieptănat, laminor, fleyer, și ring) au această caracteristică comună și importantă pentru ipotezele în care s-au efectuat cercetările, aceea de a nu avea perioade de mers în gol, funcționarea lor constînd din alternarea perioadelor de sarcină constantă cu cele de oprire.

Caracteristicile energetice ale acestor agregate sînt deci de tipul celor indicate în figura 2.

Fiecare din sectoarele de producție este format dintr-un număr oarecare de agregate cu caracteristici de funcționare aproximativ identice, care lucrează împreună în paralel. Pe agregat, caracteristicile pot fi trasate $P = f(A)$, unde $A$ este productivitatea în kilograme, pentru materialul de numărul dat care se lucrează pe mașina respectivă. Funcționarea în paralel a agregatelor impune pentru determinarea caracteristicii energetice, pe întregul sector, adunarea caracteristicilor pentru fiecare agregat în parte. Acest lucru nu poate fi făcut atît timp cît pentru un agregat se dă producția în kilograme de un fir anumit, deoarece este clar că un kilogram de fir cu numărul ridicat necesită pentru fabricarea lui mai multă energie decît un kiogram cu număr scăzut.

Unitatea comună de referire a caracteristicilor energetice pentru fiecare agregat a fost ales kilonumărul. Pentru ca în adevăr această alegere să fie justificată, trebuie ca între consumul de energie electrică pentru producerea unui kilogram de fir și numărul firului să fie îndeplinită relația :

$$\frac{w_m}{N_m} = K,$$

unde

$w_m$ —consumul specific de energie pentru un kg de fir ;

$N_m$ — numărul firului respectiv ;

$K$ — consumul specific pentru firul cu numărul 1.

Deci, cînd $N_m = N_1 = 1$, $w_m = w_1 = K$.

În acest caz se poate spune că numărul firului reprezintă un indice care caracterizează cu adevărat capacitatea de consum energetic al fiecărui fir.

Caracteristica energetică a sectorului este atunci identică cu cea a unui agregat, în ipoteza simplificatoare că toate agregatele funcționează cu aceeași productivitate momentană, cu alte cuvinte cu același factor de utilizare intensivă a mașinii. Pentru a obține însă caracteristica energetică a tuturor secțiilor considerate, se adună la consumul propriu-zis al agregatelor din aceste secții, pentru fiecare anotimp, o cifră medie care să reprezinte consumul de energie electrică pentru iluminat și condiționare, consumuri ce nu variază direct proporțional cu producția și care sînt în funcție numai de anotimp.

În acest caz obținem o caracteristică energetică de forma

$$P = P_0 + wA,$$

unde

$P_0$ — consumul de energie electrică pentru condiționare și iluminat ;

$w$ — consumul specific pentru un kilonumăr ;

$A$ — productivitatea medie.

## IV. Analiza și interpretarea datelor

Proprietatea numărului pentru un fir de a caracteriza capacitatea de consum energetic a firului respectiv, a fost verificată prin calcularea consumului specific de energie electrică pe kilonumăr pe un interval de 12 luni, în care s-a considerat că variația producției în kg pentru diferite fire este suficient de mare.

Pentru comparație se dau coeficienții celor 12 ecuații ce se pot forma cu datele din 12 luni, reducînd la unitate coeficientul primei necunoscute, adică $w_{27}$ (consumul specific de energie pentru un kilogram de nr. 27). Aceștia sînt trecuți în tablourile nr. 1 și 2.

În afară de datele lunare s-au efectuat ridicări experimentale la două ringuri obținîndu-se în acest fel consumul specific de energie pe un kilonumăr.

Datele lunare sînt trecute în tablourile nr. 3 și 4.

Din aceste date a fost calculat consumul specific de energie electrică pentru un kilonumăr, separat pentru secția ring și separat pentru întregul proces, bataj-ring inclusiv.

În prelucrarea datelor inițiale (kilograme) pentru calculul producției în kilonumere, s-au utilizat numerele nominale pentru fiecare fir, și nu cele reale determinate prin probe de laborator, deoarece numărul nominal este acela care apare în evidența fabricii.

Utilizînd datele lunare pentru secția ring, s-a obținut un consum specific mediu ($w'$) pe kilonumăr egal cu (tabloul nr. 3).

$$w'_{kN} = 0{,}02497\text{-}k\text{Wh/kN} \cong 25 \text{ kWh/tN}.$$

Abaterea medie ($q$) a valorilor de consum specific pentru un kN, față de consumul mediu, s-a calculat cu formula

$$q = \sqrt{\frac{\overline{Q}}{m}},$$

unde $Q$ reprezintă suma patratelor diferențelor, iar $m$ numărul punctelor determinate;

$$q = \sqrt{\frac{10{,}003 \times 10^{-6}}{12}} = 0{,}2887 \cdot 10^{-3}.$$

Abaterea relativă procentuală va fi

$$\varepsilon = \frac{q}{w'_{kN}} = \frac{0{,}02887 \times 10^{-3}}{0{,}02497} \cdot 100 = 1{,}15\ \%.$$

La fel pentru întregul proces (tabloul nr. 4).

$$w'_{kN} = 0{,}04014 \text{ kWh/kN},$$

$$q = \sqrt{\frac{25{,}0379 \times 10^{-6}}{12}} = 1{,}444 \times 10^{-3},$$

$$\varepsilon = \frac{1{,}444 \times 10^{-3}}{0{,}04014} \cdot 100 = 3{,}59\ \%.$$

Rezultă din examinarea celor expuse că se poate în adevăr vorbi de existența unui consum specific de energie pentru un kilonumăr aproximativ constant, dată fiind abaterea procentuală mică a valorilor de consum specific unitar față de cel mediu.

Dacă ne gîndim la randamentul procesului de toarcere care este de aproximativ 2 %, atunci rezultatul obținut era de așteptat deoarece un kilonumăr reprezintă de fapt un kilometru parcurs pe cilindrii debitori ai mașinii, iar energia consumată de mașină este proporțională cu această mărime.

Prin toate secțiile de la bataj pînă la ring care reprezintă un flux continuu sînt prelucrate un număr redus de fire (semitort). În secția ring din fiecare fel de semitort se scot mai multe numere de fir de finețe apropiată. Astfel, așa cum este arătat în schemă, din semitortul cu nr. 12 se pot scoate șase feluri de fire. Din această cauză relația $\frac{w_m}{N_m} = K$ corespunde numai pentru secția ring și este mai puțin valabilă pentru întregul proces.

Acest lucru se poate observa din faptul că la datele lunare abaterea procentuală relativă a consumului specific pe kilonumăr este mai mică pentru secția ring decît pentru întregul proces (1, 15 % față de 3,59 %).

Variația consumului specific pentru un kilonumăr, chiar în limite mici, are o explicație care rezultă din faptul că valoarea coeficientului de utilizare intensivă nu este constantă, ci variază în limite destul de mici.

Dat fiind că productivitatea teoretică curentă se poate cunoaşte din indicaţiile contorilor de la maşină, se poate trasa o curbă din datele celor 12 luni care să reprezinte variaţia consumului specific pe kilonumăr, funcţie de coeficientul de utilizare intensivă a ringului.

Acest lucru se poate face în felul următor:

Suma înregistrărilor contorilor de la toate maşinile, înmulţită cu numărul de fuse, dă lungimea de fir produsă de cilindri debitori ai maşinii. Făcînd produsul între valoarea astfel căpătată şi coeficientul mediu de scurtare pe secţie în luna respectivă, se obţine tocmai producţia teoretică care s-ar fi putut realiza dacă toate maşinile ar fi lucrat la vitezele stabilite, fără fuse oprite, rebuturi sau fire rupte.

Făcînd raportul între producţia realizată în acel interval de timp şi producţia teoretică, calculată în modul arătat mai înainte, se obţine coeficientul de utilizare intensivă a maşinilor din secţia ring.

S-a luat pentru analiză datele lunare şi nu cele zilnice din două motive:

— Modul de evidenţă a producţiei este defectuos. În cazul datelor zilnice, evidenţa producţiei duce la variaţii mai mari de la zi la zi a consumului specific pe kilonumăr, pe cînd în cazul datelor lunare, nu are decît o influenţă neglijabilă. Acest lucru se explică prin faptul că producţia unui ring fiind măsurată o dată la fiecare levată şi un fir de număr mai mare avînd mai puţine levate, se întîmplă ca, o parte din producţia realizată într-o zi (intervalul între două citiri ale contorului) să fie trecută pe ziua următoare cînd s-a făcut ridicarea levatei.

— Variaţia sortimentului este mai mare în cazul datelor lunare decît în cazul datelor zilnice.

În afară de datele statistice au fost analizate citirile contorilor de energie şi producţia pe două ringuri pe care au fost produse numerele: 34, 40, 50, 60, 70, 85. Datele sînt trecute în tabloul nr. 5.

S-a obţinut un consum specific mediu pentru un kilonumăr:

$w'_{kN} = 0{,}03120$ kWh/kN.

Abaterea medie s-a obţinut

$$q = \sqrt{\frac{10{,}9015 \times 10^{-6}}{6}} = 1{,}348 \times 10^{-3}$$

Abaterea relativă procentuală

$$\varepsilon = \frac{1{,}348 \times 10^{-3}}{31{,}20 . 10^{-3}} \cdot 100 = 4{,}32\ \%.$$

După cum era şi de aşteptat rezultatele obţinute arătă că studiul pe o singură maşină este influenţat în mai mare măsură de factorii legaţi de evidenţă amintiţi (ca modul de calcul zilnic al producţiei).

În plus, cele două ringuri studiate diferă prin faptul că sînt de două tipuri diferite, unul cu viteză constantă şi al doilea cu viteză variabilă. Viteza variabilă la cel de al doilea ring era necesară pentru ca la începutul şi la sfîrşitul unei levate, turaţia să fie ţinută sub cea de regim continuu.

Cele arătate explică de ce abaterea medie procentuală este de 4,32 %.

În calculele efectuate cu datele statistice s-a făcut ipoteza că maşinile ce lucrează în paralel au caracteristici identice; nici nu ar fi posibil, practic, determinarea acestor caracteristici de la maşină la maşină. În realitate însă maşinile nu funcţionează identic şi chiar o aceeaşi maşină nu-şi menţine în timpul dintre două revizii şi reparaţii generale, aceleaşi caracteristici de funcţionare. Se înţelege atunci de ce consumul specific obţinut pentru un ring este de 31,20 kWh/tN în timp ce acelaşi consum însă pe întreaga secţie este de circa 25 kWh/tN.

În literatura de specialitate consultată se găsesc numai două date asupra consumului specific de filatură şi anume:

34. kWh/tN [2]
80 „ [3].

*Tabloul nr. 1*

| Data | Numere | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 27 kg | 34 kg | 40 kg | 50 kg | 54 kg | 60 kg | 70 kg | 85 kg | 100 kg |
| aprilie 1954 | 47 722 | 28 593 | 132 612 | 252 114 | 154 450 | 782 | 108 336 | 12 849 | 89 798 |
| mai „ | 51 232 | 36 427 | 107 624 | 249 624 | 159 773 | 17 845 | 107 112 | 14 105 | 78 126 |
| iunie „ | 49 248 | 18 112 | 112 782 | 287 891 | 177 693 | 10 450 | 112 277 | 21 292 | 67 507 |
| iulie „ | 42 748 | 22 153 | 139 598 | 285 159 | 182 418 | 16 202 | 113 621 | 19 016 | 81 178 |
| august „ | 21 810 | 27 704 | 167 412 | 236 373 | 147 819 | 26 153 | 94 363 | 23 581 | 75 055 |
| septembrie „ | 25 302 | 27 880 | 171 224 | 241 708 | 174 706 | 21 996 | 111 592 | 15 257 | 77 837 |
| octombrie „ | 25 114 | 23 977 | 121 688 | 365 863 | 156 871 | 47 081 | 84 538 | 25 437 | 46 447 |
| noiembrie „ | 22 913 | 31 202 | 147 894 | 300 960 | 165 277 | 25 509 | 102 788 | 23 858 | 50 444 |
| decembrie „ | 21 983 | 49 804 | 131 754 | 331 534 | 113 690 | 23 986 | 101 413 | 15 273 | 55 594 |
| ianuarie 1955 | 20 410 | 28 260 | 107 702 | 295 474 | 178 666 | 26 690 | 79 442 | 12 874 | 53 380 |
| februarie „ | 20 096 | 32 970 | 87 292 | 297 044 | 212 264 | 15 700 | 88 862 | 14 130 | 63 428 |
| martie „ | 29 434 | 30 876 | 87 691 | 330 017 | 241 347 | 2 229 | 95 054 | 19 211 | 86 881 |

*Tabloul nr. 2*

| Data | Numere | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 27 | 34 | 40 | 50 | 54 | 60 | 70 | 85 | 100 |
| aprilie 1954 | 1 | 0,599 | 2,78 | 5,28 | 3,23 | 0,0164 | 2,27 | 0,27 | 1,88 |
| mai „ | 1 | 0,71 | 2,09 | 4,85 | 3,1 | 0,317 | 2,09 | 0,275 | 1,53 |
| iunie „ | 1 | 0,368 | 2,287 | 5,84 | 3,6 | 0,212 | 2,275 | 0,431 | 1,369 |
| iulie „ | 1 | 0,52 | 3,26 | 6,66 | 4,27 | 0,379 | 2,66 | 0,446 | 1,99 |
| august „ | 1 | 1,27 | 7,65 | 10,8 | 6,75 | 1,195 | 4,31 | 1,08 | 3,44 |
| septembrie „ | 1 | 1,095 | 6,74 | 9,5 | 6,87 | 0,865 | 4,41 | 0,599 | 3,05 |
| octombrie „ | 1 | 0,955 | 4,84 | 14,57 | 6,21 | 1,868 | 3,36 | 1,01 | 1,842 |
| noiembrie „ | 1 | 1,36 | 6,51 | 13,15 | 7,2 | 1,11 | 4,48 | 1,038 | 2,21 |
| decembrie „ | 1 | 3,2 | 5,97 | 15,0 | 5,37 | 1,083 | 4,59 | 0,69 | 2,534 |
| ianuarie 1955 | 1 | 1,385 | 5,3 | 14,5 | 8,74 | 1,318 | 3,9 | 0,629 | 2,62 |
| februarie „ | 1 | 1,64 | 4,35 | 14,78 | 10,55 | 0,78 | 4,41 | 0,702 | 3,18 |
| martie „ | 1 | 1,043 | 2,98 | 11,2 | 8,05 | 0,0756 | 3,225 | 0,651 | 2,965 |

*Tabloul nr. 3*

| Data | | $A$ kN | $P$ kWh | $w$ kWh/kN | $w' - w$ | $(w' - w)^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| aprilie | 1954 | 46 433 290 | 1 107 399 | 0,02384 | $1,13\ 10^{-3}$ | $1,2769\ 10^{-6}$ |
| mai | „ | 45 854 334 | 1 099 355 | 0,02397 | 1,00 „ | 1,0000 „ |
| iunie | „ | 47 756 125 | 1 157 347 | 0,02423 | 0,74 „ | 0,5476 „ |
| iulie | „ | 50 551 654 | 1 190 889 | 0,02355 | 1,42 „ | 2,0164 „ |
| august | „ | 45 998 607 | 1 161 524 | 0,02525 | 0,28 „ | 0,0784 „ |
| septembrie | „ | 48 526 166 | 1 217 887 | 0,02509 | 0,12 „ | 0,0114 „ |
| octombrie | „ | 48 958 255 | 1 221 341 | 0,02494 | 0,03 „ | 0,0009 „ |
| noiembrie | „ | 47 631 009 | 1 229 332 | 0,02580 | 0,83 „ | 0,6889 „ |
| decembrie | „ | 45 919 828 | 1 172 969 | 0,02554 | 0,57 „ | 0,3249 „ |
| ianuarie | 1955 | 43 836 284 | 1 177 484 | 0,02686 | 1,89 „ | 3,5721 „ |
| februarie | „ | 46 175 898 | 1 156 811 | 0,02505 | 0,08 „ | 0,0064 „ |
| martie | „ | 51 999 869 | 1 334 648 | 0,02566 | 0,69 „ | 0,4761 „ |
| Total ..... | | 569 641 319 | 14 226 986 | 0,02497 | — | 10,0030 „ |

*Tabloul nr. 4*

| Data | | $A$ kN | $P$ kWh | $w$ kWh/kN | $w' - w$ | $(w' - w)^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| aprilie | 1954 | 46 433 290 | 1 817 102 | 0,03913 | $1,01\ 10^{-3}$ | $1,0201\ 10^{-6}$ |
| mai | „ | 45 854 334 | 1 787 049 | 0,03897 | 1,17 „ | 1,3689 „ |
| iunie | „ | 47 756 125 | 1 863 687 | 0,03902 | 1,12 „ | 1,2544 „ |
| iulie | „ | 50 551 654 | 1 877 629 | 0,03714 | 3,00 „ | 9,0000 „ |
| august | „ | 45 998 607 | 1 840 354 | 0,04000 | 0,14 „ | 0,0196 „ |
| septembrie | „ | 48 526 166 | 1 929 238 | 0,03975 | 0,39 „ | 0,1521 „ |
| octombrie | „ | 48 958 255 | 2 000 381 | 0,04085 | 0,71 „ | 0,5041 „ |
| noiembrie | „ | 47 631 009 | 1 964 393 | 0,04124 | 1,10 „ | 1,2100 „ |
| decembrie | „ | 45 919 828 | 1 900 918 | 0,04139 | 1,25 „ | 1,5625 „ |
| ianuarie | 1955 | 43 836 284 | 1 883 491 | 0,04296 | 2,82 „ | 7,9524 „ |
| februarie | „ | 46 175 898 | 1 864 246 | 0,04037 | 0,23 „ | 0,0529 „ |
| martie | „ | 51 999 869 | 2 138 155 | 0,04111 | 0,97 „ | 0,9409 „ |
| Total ..... | | 569 641 319 | 22 866 643 | 0,04014 | | 25,0379 „ |

*Tabloul nr. 5*

| Numărul firului | $A$ Kg | $P$ diviziuni | $A$ kN | $P$ kWh | $w$ kWh/kN | $w' - w$ | $(w' - w)^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 70 | 1 107 | 196 | 77 490 | 2 352 | 0,03035 | $0,85.10^{-3}$ | $0,7225.10^{-3}$ |
| 85 | 270 | 63 | 22 950 | 756 | 0,03294 | 1,74 „ | 3,0276 „ |
| 34 | 516 | 45,5 | 17 544 | 546 | 0,03112 | 0,08 „ | 0,0064 „ |
| 50 | 416 | 56 | 20 800 | 672 | 0,03231 | 1,11 „ | 1,2321 „ |
| 60 | 854 | 129 | 51 240 | 1 548 | 0,03023 | 0,97 „ | 0,9400 „ |
| 40 | 628 | 70 | 25 120 | 840 | 0,03343 | 2,23 „ | 4,9729 „ |
| Total ... | | | 215 144 | 6.714 | | | 10,9015 |

*Tabloul nr. 6*

| Data | | Lumină kWh | Condiţionare kWh |
|---|---|---|---|
| aprilie | 1954 | 88 909 | 237 035 |
| mai | „ | 80 368 | 287 445 |
| iunie | „ | 80 258 | 343 616 |
| iulie | „ | 78 563 | 350 427 |
| august | „ | 82 720 | 333 710 |
| septembrie | „ | 98 037 | 277 585 |
| octombire | „ | 113 822 | 221 945 |
| noiembrie | „ | 130 527 | 231 935 |
| decembrie | „ | 160 994 | 239 865 |
| ianuarie | 1955 | 156 300 | 358 899 |
| februarie | „ | 162 187 | 377 249 |
| martie | „ | 153 508 | 448 288 |

Cifra căpătată de 40 kWh/tN pentru întreg procesul bataj-ring (fără consumul pentru condiționare și lumină) se apropie mai mult de prima, reprezentînd deci și aceasta consumul specific de energie electrică de la bataj la ring.

### V. Întocmirea caracteristicii energetice propriu-zise

După cum s-a arătat mai sus, în afară de consumul tehnologic de energie electrică ce variază proporțional cu producția mai intervine și consumul de energie pentru condiționarea aerului și iluminat care nu este funcție decît de anotimp ; caracteristica energetică are deci forma

$$P = P_0 + w\,A.$$

atît pentru secția ring cît și pentru secțiile de la bataj la ring.

S-au împărțit lunile anului în patru grupe, după consumul de lumină și condiționare (tabloul nr. 6) și ecuațiile caracteristice au rezultat :
aprilie, mai

$$P_1 = 346\,878 + 40{,}14\,A,$$

iunie, iulie, august

$$P_2 = 423\,098 + 40{,}14\,A,$$

septembrie, octombrie, noiembrie, decembrie

$$P_3 = 368\,870 + 40{,}14\,A,$$

i
anuarie, februarie, martie

$$P_4 = 552\,144 + 40{,}14\,A.$$

Aceste caracteristici sînt date mai mult ca exemplu, deoarece date medii pentru consumul cerut de condiționarea aerului și iluminat pot fi justificate numai pe baza unei statistici de mai mulți ani.

### VI. Concluzii

Raportarea consumului de energie în filaturi la kilonumăr poate fi considerată pe deplin justificată numai în ceea ce privește sectorul ring. Totuși și pentru celelalte sectoare de fabricație se poate face această raportare, abaterile de la o valoare medie a consumului specific de energie pe kilonumăr, rămînînd în limite admisibile.

Pe întregul proces însă acest consum depinde de sortimentul realizat. Așa că dacă pe secția ring se poate da pentru consumul specific o valoare ce poate fi utilizată de toate întreprinderile cu utilaj identic, pe întregul proces (bataj ring) poate fi obținută numai o valoare caracteristică întreprinderii și care poate fi determinată din date statistice pe un anumit interval, în condiții asemănătoare.

### BIBLIOGRAFIE

1. I. V. Gofman, *Bazele normării și analizei consumului de energie în industrie.* Ed. energetică de stat, București, 1952, cap. II, paragraf 5.
2. I. V. Gofman i Gl. Gospitalnic, *Organizația i planirovanie energohaziaistva promîșlennîh predpriații.* Gosenergoizdat, Moscova-Leningrad, 1954.
3. V. A. Kuțenov i E. O. Steingauz, *Voprosî tehnikoekonomiceskovo proiektirovania krupnîh ghidrostanții v energosistemah.* Gosenergoizdat, Moscova- Leningrad, 1953.

# EXPERIMENTĂRI REALIZATE CU UN COMPRESOR CU JET DE GAZE NATURALE

DE

C. A. VASILESCU şi V. PIMSNER

1. În cadrul problemei *Utilizarea energetică a gazelor naturale* s-au executat în vara anului 1955 o serie de experimentări cu un compresor cu jet de gaz în cîmpurile de gaze naturale din Transilvania.

Faţă de alte compresoare experimentate de autori *) compresorul cu jet ce se prezintă are următoarele caracteristici nominale :

presiunea superioară . . . . . $p_s = 32$ kgf/cm²,
presiunea inferioară . . . . . $p_i = 5$ kgf/cm²,
presiunea medie . . . . . $p_m = 6$ kgf/cm².

Debitele relativ mari şi presiunile relativ scăzute au dus la dimensiuni mai mari ale compresorului cu jet de gaze.

Compresorul cu jet de gaze a fost montat între două sonde (fig. 1) debitînd într-o conductă legată de punctul de utilizare al gazelor naturale. Dat fiind raportul mare de destindere al gazului în ajutajul compresorului, (circa 6,3), s-a prevăzut un încălzitor pentru gazul de presiune superioară. Pe conductele de legătură s-au prevăzut ventile prin care se poate varia debitul, respectiv presiunea gazului.

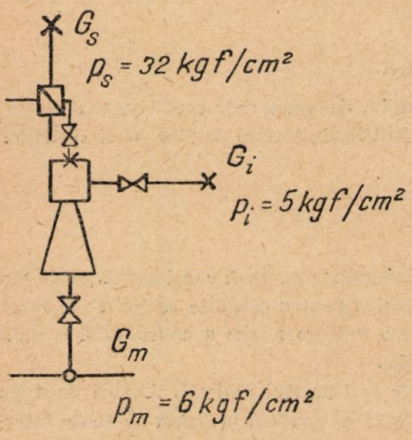



Fig. 1. — Schema de montaj a compresorului cu jet experimentat.

Compresorul cu jet a fost realizat cu posibilitatea de a i se schimba două camere de amestec şi două ajutaje. De asemenea s-a prezăzut posibilitatea ca să se varieze distanţa dintre ajutaj şi difuzor. Parametrii funcţionali variabili au fost presiunea superioară (31,5 ; 26 ; 21 ; 16 ; 11 kgf/cm²) şi presiunea medie (6 şi 7 kgf/cm²). Măsurătorile (presiuni şi debite) pe cele trei conducte ce leagă compresorul cu jet s-au făcut cu precizie tehnică.

2. Încercările au dus la o serie de rezultate, din care, în această notă, se prezintă următoarele :

2.1. Dat fiind coeficientul mare de injecţie ce se stabileşte datorită raportului mic de creştere a presiunilor şi energiei disponibile mari a gazelor de presiune superioară, sonda de presiune inferioară este solicitată foarte mult de debitul de regim al sondei de presiune superioară.

2.2. Ca urmare a acestui fapt debitul sondei de presiune inferioară depăşeşte valoarea raţională şi presiunea de lucru a sondei, măsurată la capul de erupţie, scade (fig. 2).

2.3. Prin această scădere, care este cu atît mai mare, cu cît presiunea gazelor de presiune superioară este mai mare, se măreşte raportul de comprimare a gazelor în compresor. Se ajunge astfel la o micşorare a coeficientului de injecţie măsurat, cu cît presi

*) Acest volum, p. 207.

unea sondei de presiune superioară este mare (fig. 3). Coeficientul de injecție va avea un maximum pentru un anumit $p_s$, după care scăderea ulterioară a presiunii superioare duce la scăderea lui $u$.

**2.4.** În timpul măsurătorilor, datorită imperfecțiunilor de reglaj, a variat și presiunea din conducta de presiune medie. Citirile nu s-au putut face cu suficientă precizie, astfel că din seria de măsurători prezentată nu s-a putut trage vreo concluzie asupra influenței parametrilor constructivi.

**2.5.** Deși prevăzut cu încălzitor, compresorul experimentat a putut să funcționeze fără givraj și fără o încălzire prealabilă.

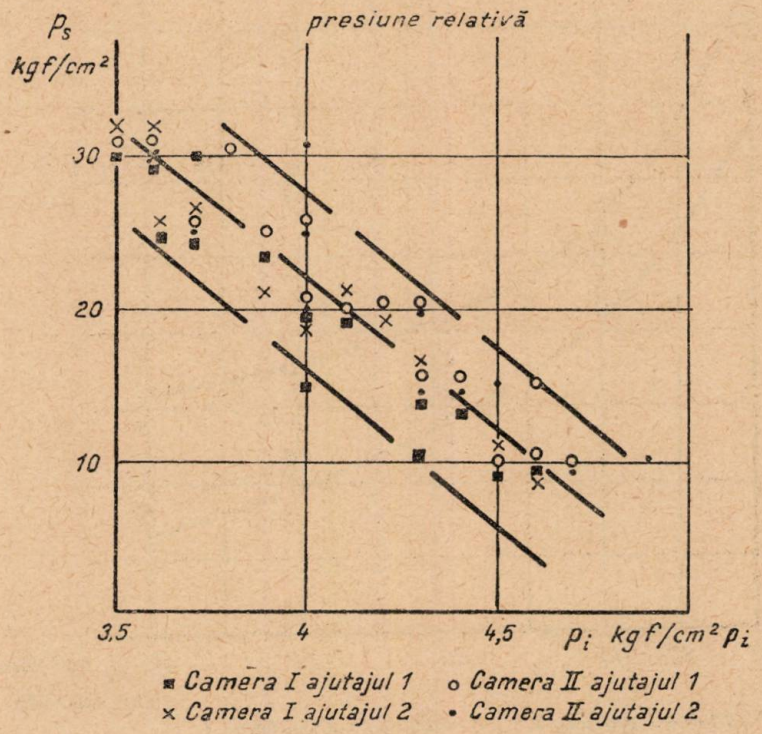



Fig. 2. — Scăderea de presiune la sonda de presiune inferioară în timpul funcționării compresorului cu jet de gaze.

În figura 4 se prezintă următoarele curbe :

Curba $A$ — $B$, curba limită a formării hidrurilor de metan ; în stînga acestei curbe este domeniul de formare a hidrurilor.

Domeniul $a$ reprezintă locul punctelor ce figurează starea gazului de presiune superioară la intrarea în compresorul cu jet (presupunîndu-se că temperatura la gura sondei este de 5—15°C și că laminarea se face fără variere de temperatură).

Curba $b$ reprezintă temperaturile atinse pentru diferite presiuni inițiale — ca urmare a destinderii în ajutaj, calculate în ipoteza gazelor ideale și a unei evoluții izentropice.

Curba $c$ reprezintă temperaturile atinse — pentru diferite presiuni inițiale — ca urmare a destinderii în ajutaj, calculate în ipoteza gazelor reale și a unei evoluții politropice.

Curba $C - E$ reprezintă stările gazului după destindere pînă la presiunea inferioară, $p_i = 5$ kgf/cm², conform curbei *b*, iar curba $F - G$ acelaşi lucru conform curbei *c*.

Se observă că pentru presiuni superioare $p_s$ între 32 şi 20 kgf/cm² (curba *c*), gazul destins în ajutaj pînă la 5 kgf/cm² are stări care-l situează în regiunea formării hidraţilor de metan (regiunea $C - F - D$).

**3.** Ca urmare a acestor rezultate se pot trage următoarele concluzii :

**3.1.** Compresorul cu jet de gaze, montat între două sonde, poate da rezultate slabe în exploatare, dacă sonda de presiune superioară este pusă să funcţioneze cu regimul apropiat

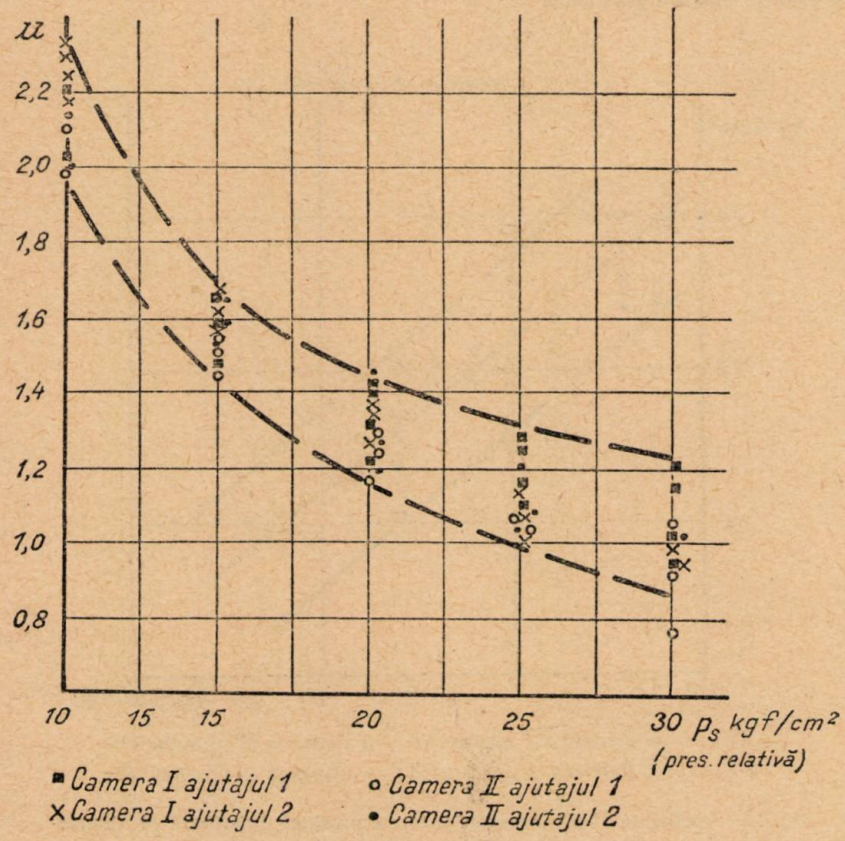



Fig. 3. — Dependenţa coeficientului de injecţie măsurat, *u*, de valoarea presiunii $p_s$.

ca debit de cel de al sondei de presiune inferioară, compresorul fiind proiectat pentru coeficienţi de injecţie mari.

**3.2.** În cazuri de acest fel este raţional să se folosească un compresor cu jet de gaze naturale pentru mai multe sonde de presiune inferioară. În acest mod un singur orizont de gaze de presiune superioară poate exploata mai multe orizonturi de gaze de presiune inferioară.

**3.3.** Funcţionarea compresorului cu jet la temperaturi scăzute, fără givraj, poate fi explicată în trei feluri ;

— lipsa apei în gaz ;

— durata mai mare a formării compuşilor chimici decît timpul ce se scurge de la ieşirea gazului din ajutaj şi amestecarea sa cu gazul de presiune inferioară, cînd micşorîndu-se viteza creşte din nou temperatura ;

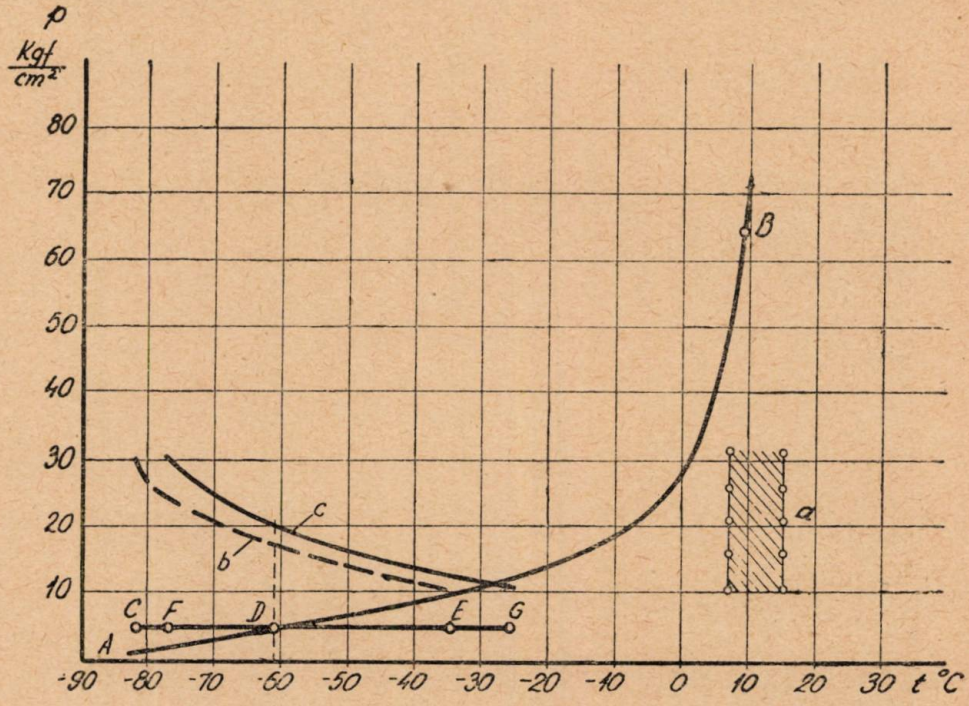



Fig. 4. — Diagrama $p - t$ pentru studiul givrajului.

— formarea hidraţilor de metan, dar imposibilitatea ca aceştia să se depună pe perete datorită vitezelor mari ale gazului.

Prima ipoteză se infirmă de faptul că gazul iese încărcat cu apă din zăcămînt şi chiar trecut prin separator el mai rămîne încă saturat cu apă.

Celelalte două ipoteze, care sînt de mare interes pentru funcţionarea compresoarelor cu jet de gaze şi în special a turbinelor de trecere, necesită un studiu experimental adecvat.

# STUDIUL UNEI MAŞINI ELECTRICE DE CURENT CONTINUU, CU CARACTERISTICA SERIE, FĂRĂ ÎNFĂŞURARE DE EXCITAŢIE, FOLOSIND FLUXUL DE REACŢIE AL INDUSULUI *)

DE

FRANSUA ALEXANDRU

## I. Principiul de funcţionare

*A.* Maşina electrică, al cărei studiu teoretic şi experimental urmează în paginile de mai jos, face parte din categoria maşinilor electrice speciale, denumite metadine.

Un fenomen important care stă la baza metadinelor este faptul, că tensiunea electromotoare $U_e$, culeasă între două perii plasate pe colector şi cuplul electromagnetic $M$, care acţionează asupra rotorului într-o maşină de curent continuu normală, depind direct numai de mărimea fluxului care străbate indusul şi nu de felul cum variază în lungul periferiei indusului inducţia magnetică $B$.

Un alt fapt important care stă la baza funcţionării multor metadine este folosirea fluxului propriu de reacţie al indusului drept flux inductor. Prezenţa colectorului cu perii fixe în spaţiu şi faptul că înfăşurarea indusului maşinii normale de curent continuu este închisă, perfect simetrică, avînd practic foarte multe conductoare, conduce la echivalarea, din punct de vedere magnetic, a indusului real rotitor în spaţiu cu un indus fictiv fix în spaţiu. Drept consecinţă, cîmpul magnetic de reacţie al indusului este un cîmp constant în timp şi fix în spaţiu, cu foarte bună aproximaţie. Prin urmare, faţă de fluxul propriu indusul se comportă întru totul la fel ca şi faţă de un flux inductor exterior.

În maşinile normale de curent continuu, peste cîmpul magnetic inductor se suprapune, la funcţionarea în sarcină, cîmpul de reacţie al indusului. Cîmpul magnetic de reacţie este foarte puternic putînd produce saturarea vîrfurilor pieselor polare, deformarea sensibilă a cîmpului inductor şi micşorarea valorii fluxului util. De aceea, cîmpul magnetic de reacţie al indusului este foarte neplăcut, luîndu-se o serie de măsuri pentru micşorarea influenţei lui. Dimpotrivă, într-o serie de metadine fluxul de reacţie este folosit din plin. Din categoria acestor metadine face parte şi maşina descrisă mai jos.

Ideea unei asemenea maşini este cuprinsă, în parte, în următoarele rînduri care aparţin lui I. M. Pestarini:

„S-ar putea crede că, din motive de simetrie, cuplul unei metadine, al cărui circuit statoric nu posedă nici o înfăşurare şi are forma unui tor dreptunghiular, este nul, cu aproximaţia cuplului datorit histerezisului. Aceasta este adevărat dacă fierul statorului este în aceeaşi stare

*) Autoreferat asupra lucrării de disertaţie susţinută la 19 octombrie 1955.

de saturaţie pretutindeni. Dar, în general, nu acesta este cazul; torul statoric acţionează ca şi cum ar avea poli aparenţi şi metadina dezvoltă un cuplu important".

J. M. Pestarini are perfectă dreptate în cele afirmate, numai că trebuie făcute cîteva precizări.

În primul rînd, starea de saturaţie diferită a unui fier statoric deposedat de orice înfăşurare, avînd forma unui tor (deci intrafier uniform la periferia rotorului), poate fi cauza unui cuplu însă numai la o saturaţie nesimetrică în raport cu axa periilor la periferia rotorului.

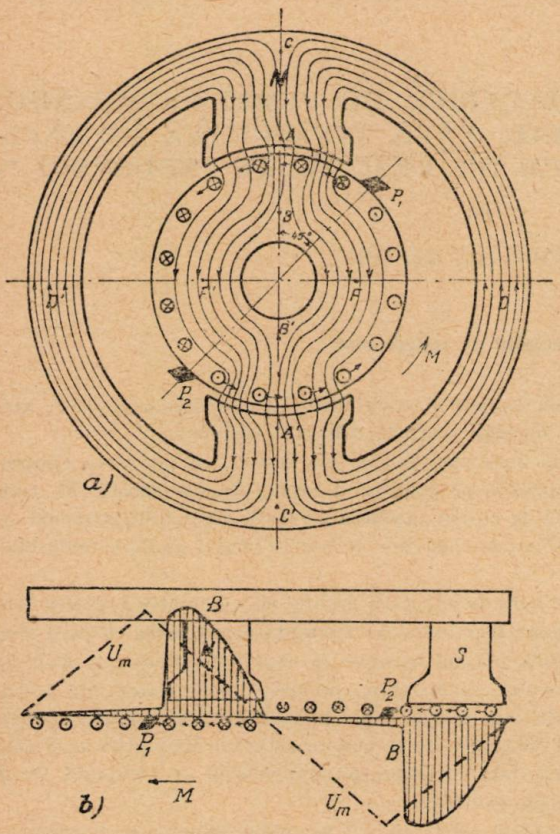



Fig. 1

În al doilea rînd, această saturaţie nesimetrică se realizează practic destul de greu.

În al treilea rînd, presupunînd existentă o asemenea saturaţie nesimetrică la periferia rotorului, nu se poate ajunge la cupluri importante.

Ideea care se impune atunci este următoarea: în loc de tor dreptunghiular, deci întrefier uniform şi saturaţie diferită de la punct la punct şi nesimetrică în raport cu axa periilor, realizăm nesimetria dorită prin poli aparenţi, nesimetrici în raport cu axa periilor. Se obţine astfel o maşină electrică cu mai multe şanse de a dezvolta un cuplu important. O asemenea soluţie nu este indicată de J. M. Pestarini şi pînă în prezent nu a fost regăsită în literatura pe care am avut-o la dispoziţie.

*B*. În figura 1, *a* se arată o schiţă a maşinii presupusă bipolară. Polii principali nu posedă nici o înfăşurare de excitaţie, iar axa polilor şi axa periilor fac un unghi de 45° şi nu 90° ca în maşina normală bipolară. Coeficientul de acoperire al piesei polare este de circa 0,35—0,45, pe cînd în maşina normală coeficientul de acoperire este aproximativ dublu. Rotorul şi înfăşurarea lui este de tipul curent întîlnit, fără nici o modificare. Înfăşurarea se consideră alimentată prin perii de la o sursă exterioară. Sensul curentului în conductoarele înfăşurării este indicat în figură.

În figura 1, *b* este reprezentată aceeaşi maşină tăiată după o generatoare şi desfăşurată. Linia întreruptă reprezintă tensiunea magnetomotoare $U_m$ în lungul periferiei rotorului în întrefier, tensiune creată de amperspirele rotorului.

Inducţia magnetică corespunzătoare $B$ (ţinînd seama şi de saturaţia circuitului magnetic) este arătată în figura 1, *b* prin linie neîntreruptă. Liniile de cîmp ale inducţiei magnetice, în întreaga maşină, se pot urmări după figura 1, *a*. Acest spectru este aproximativ, în sensul că nu s-a ţinut seama de liniile de dispersiune ale rotorului şi de acele linii care străbat spaţiul dintre rotor şi jugul statoric, de o parte şi de alta a polilor principali, linii a căror lungime prin aer este suficient de mare ca în aceste porţiuni ale periferiei rotorului să se considere inducţia practic nulă.

În cîmpul astfel creat de înfășurarea rotorului se remarcă prezența a doi poli, unul N și celălalt S, sub care se găsesc conductoare parcurse de curent. Asupra acestor conductoare se vor exercita forțe de natură electromagnetică. Se poate verifica ușor că sensurile acestor forțe sînt în concordanță sub ambii poli. În consecință, asupra rotorului se va exercita un cuplu mecanic, care va pune în rotație această piesă. Cîmpul propriu al rotorului fiind f.x în spațiu, rotorul rotindu-se în acest cîmp o dată cu conductoarele sale, se va induce în aceste conductoare o tensiune electromotoare opusă ca sens tensiunii aplicate la perii. Mașina va fi deci motor și funcționarea, sa mai departe este cu totul analogă motoarelor normale de curent continuu.

Trebuie subliniat că, pentru o mai bună utilizare a circuitului magnetic, ar exista tendința de a mări deschiderea piesei polare, adică coeficientul de acoperire. În cazul motorului descris mărirea coeficientului de acoperire peste valoarea de 0,5 nu este posibilă principial, în acest caz cîmpul indusului sub poli inversîndu-se și forțele care se exercită asupra conductoarelor rotorului acoperite de poli fiind parte de un sens, parte de sens contrar. Aceasta se întîmplă tocmai în mașina electrică normală, în care cuplul forțelor exercitate asupra conductoarelor rotorului de către însuși cîmpul rotoric este nul.

*C.* Motorul descris are caracteristică serie, fluxul util fiind creat de însuși curentul care trece prin indus. Motorul descris se bucură și de proprietatea de a avea o caracteristică mecanică „moale", ca și motoarele normale serie.

La pornire motorul are un cuplu mare; bineînțeles, pornirea trebuie făcută cu ajutorul unui reostat pentru limitarea curentului. Posibilități de variație a vitezei există, fie prin micșorarea tensiunii aplicate înfășurării indusului pentru micșorarea vitezei, fie prin deplasarea axei periilor din poziția de 45° electrice față de axa polilor (desigur numai în cazul lipsei polilor auxiliari), pentru mărirea vitezei.

Un dezavantaj al motorului descris îl constituie faptul că pentru inversarea sensului de rotație trebuie rotită axa periilor de la 45° electrice de o parte a axei polilor, la 45° electrice de partea cealaltă; în acest fel, sub polii care își păstrează polaritatea, vin conductoare parcurse de curent în sens opus celui dinainte de rotirea axei periilor, rezultînd schimbarea sensului forțelor electromagnetice și deci și a cuplului. Dacă acest lucru este posibil la mașinile de putere mică, care nu au poli auxiliari, la mașinile care posedă asemenea poli nu mai este posibilă. Din acest motiv domeniul de utilizare al motorului se micșorează, acționările care necesită inversări de sens de rotație (ca tracțiunea electrică) neputînd fi luate în considerație. Rămîn însă o serie de alte utilizări, ca aparatele de ridicat, acționările fără schimbare de sens de rotație, pentru care motorul descris se poate folosi. Motorul descris poate funcționa în *regim de conexiuni contrarii*.

Dacă se antrenează mașina cu ajutorul unui motor oarecare, dacă circuitul magnetic posedă o inducție remanentă și dacă circuitul electric al indusului este închis pe o rezistență de sarcină convenabilă, mașina se poate autoexcita, devenind generator cu caracteristică externă serie.

Compundarea mașinii se poate face cu ușurință, existînd suficient loc pe miezurile polare pentru plasarea unor bobine de excitație legate în derivație cu indusul.

Ar prezenta un oarecare interes funcționarea unei asemenea mașini ca mașină electrică amplificatoare tip rototrol. O astfel de funcționare este posibilă.

Funcționarea motorului în cazul cînd i se aplică la borne o tensiune sinusoidală este posibilă, încă cu un factor de putere foarte prost. Nu s-au găsit mijloacele corespunzătoare din punct de vedere practic pentru îmbunătățirea factorului de putere.

## II. Considerații calitative asupra mașinii studiate, elementelor ei constructive și parametrilor ei electrici

Pentru ca mașina descrisă să poată funcționa în condiții optime și construcția ei să fie cît mai economică, elementele sale constructive ca și parametrii ei electrici se vor deosebi de cei ai mașinii normale de curent continuu de aceeași putere, viteză și tensiune.

*A.* Se știe că, pentru o mașină de putere, viteză și tensiune dată, între fluxul în întrefier $\Phi$ și numărul de conductoare $N$ pe periferia indusului există relația

$$\Phi N = \text{const.}$$

Prin urmare, dacă, micșorăm valoarea fluxului rezultă în schimb mărirea numărului de conductoare, ceea ce duce la cheltuială de cupru, lucru pe care nu-l dorim.

Or se știe că, fluxul util care străbate întrefierul are valoarea

$$\Phi = \alpha_p \tau_p BL,$$

în care $\tau_p$ este pasul polar; $B$, inducția magnetică medie în întrefier; $L$, lungimea ideală a indusului, iar $\alpha_p$ coeficientul de acoperire al piesei polare. Cum în mașina descrisă coeficientul de acoperire are, principial, aproximativ jumătate din valoarea obișnuită în mașinile normale, la un același flux, mașina studiată trebuie să aibă produsul ($\tau_p BL$), de valoare aproximativ de două ori mai mare față de valoarea aceluiași produs în mașina clasică.

Pentru a obține acest lucru este necesară mărirea valorii inducției $B$ în întrefier. Spre a evita o saturare nepermisă a dinților va trebui să mărim lățimea acestor dinți, ceea ce revine la mărirea diametrului indusului și implicit mărirea pasului polar. Adăugînd o mărire mai puțin sensibilă a lungimii indusului, produsul ($\tau_p BL$) ajunge la valoarea dorită.

*B.* Valoarea întrefierului este dictată în mașina clasică de curent continuu de cîmpul de reacție al indusului. Spre deosebire de mașina clasică, în mașina studiată, fluxul de reacție este folosit din plin. Nu mai au deci nici un rost considerentele care se fac la mașina clasică și care dictează mărimea întrefierului. Această mărime va fi dictată numai de considerente mecanice și va fi mult mai mică decît la mașina obișnuită de curent continuu. Acest fapt constituie un avantaj important.

Legată de fenomenul reacției indusului ca și de comutație este și alegerea coeficientului de acoperire al polului. Autorii sînt de acord în a fixa limita superioară a coeficientului de acoperire în jurul valorii de 0,75, pentru mașina clasică. În mașina descrisă pe baza datelor de mai sus valoarea coeficientului de acoperire ar fi limitată deci la 0,375. Dat fiind faptul că la această mașină întrefierul este foarte mic, atît sub polul principal cît și sub polul auxiliar, credem că valoarea coeficientului de acoperire poate să fie mai aproape de cifra 0,4, adică piesa polară să se apropie mai mult de polul auxiliar, fără ca, comutația să fie periclitată. La mașini mici, sub 1 kW, fără poli auxiliari, la care reacția indusului influențează mai puțin comutația, credem că se poate alege pentru coeficientul de acoperire valoarea maximă de 0,5, fără să avem neplăceri pentru comutație. Experiența obținută pînă în prezent confirmă acest lucru.

*C.* Polii principali ai mașinii suferă în cazul mașinii studiate unele modificări constructive, ei avînd o formă mai simplă pentru matrițat, formă care duce la o economie de fier electrotehnic. În plus, polul principal ne mai avînd bobină pe miezul său poate fi mai puțin înalt decît în mașina normală.

Pentru mașinile mici, fără poli auxiliari, polul principal poate lua cea mai simplă formă posibilă, înălțimea sa $h_p$ reducîndu-se considerabil și în consecință și diametrul carcasei.

*D.* Mărimea $A = NI/2\pi aD$ a amperconductoarelor pe unitatea de lungime, la periferia indusului, va fi în cazul mașinii studiate mai mică decît la mașina normală din următorul motiv: diametrul indusului este mai mare decît la mașina obișnuită, iar numărul de amperconductoare, $NI$, se menține același.

Densitatea de curent în înfășurarea rotorică se poate lua în limitele obișnuite, sau ceva mai mare, căci în comparație cu mașina clasică, suprafața rotorică acoperită de poli este mult mai mică, viteza periferică a indusului este mai mare, și deci, condițiile de răcire ale rotorului sînt mult ameliorate.

Randamentul mașinii studiate este mai mic decît la mașina clasică, aceasta fiindcă, deși nu mai sînt pierderi în înfășurarea de excitație, totuși pierderile totale sînt mai mari, prin creșterea pierderilor în fier și prin sporirea rezistenței indusului, dat fiind faptul că, capetele de

bobină se lungesc o dată cu creşterea diametrului rotoric. Scăderea randamentului la maşinile cu poli auxiliari nu va depăşi 1—2 %, în schimb la maşinile fără poli auxiliari pare că rezultă chiar o creştere a randamentului.

*E.* Desigur, avantajul principal al maşinii constă în faptul că se reduce cantitatea de cupru. Această reducere rezultă din dispariţia înfăşurării de excitaţie de pe polii principali. Reducerea nu este însă atît de sensibilă, căci cantitatea de cupru de pe indus creşte datorită creşterii lungimii medii a spirei. Cantitatea de cupru de pe polii auxiliari rămîne în general aceeaşi, căci dacă se măreşte puţin lungimea medie a spirei o dată cu lungimea $L$ a indusului, totuşi scad amperspirele de pe pol, fiindcă scade mărimea $A$ a încărcării liniare pe periferia indusului. Cum greutăţile de cupru de pe polii principali, de pe indus şi de pe polii auxiliari au aproximativ acelaşi ordin de mărime, rezultă pentru maşina studiată o reducere a cantităţii de cupru de circa 20—25 %.

Pentru maşinile fără poli auxiliari, în care greutatea de cupru de pe polii inductori depăşeşte mult pe cea a indusului, reducerea poate ajunge la 40 %.

O dată cu reducerea cantităţii de cupru, creşte, în general, cantitatea de fier activ a maşinii. Cantitatea de fier rotoric creşte simţitor, dar în aceeaşi proporţie scade cantitatea de fier a polilor principali, rezultînd în total o creştere uşoară. Cantitatea de fier neactiv poate să scadă uşor, dat fiind faptul că diametrul exterior $D_{js}$ al carcasei este mai mic în urma micşorării înălţimii miezului polilor.

Un avantaj, din punct de vedere tehnologic, este dispariţia manoperei necesară confecţionării bobinelor de excitaţie, a şabloanelor corespunzătoare şi simplificării matriţei pentru tola polului principal.

## III. Metoda de calcul

Faţă de o maşină de aceeaşi putere, tensiune şi viteză, construită în mod normal şi pentru care, în foarte multe lucrări, se indică date de orientare în proiectare, maşina studiată va avea un diametru $D$ al indusului mai mare, o lungime $L$ a fierului activ al indusului mai mare, un întrefier limitat numai de considerente mecanice, aproximativ acelaşi număr $N$ de conducătoare pe periferia rotorului sau ceva mai multe, aproximativ acelaşi număr de crestături $Z$ sau ceva mai multe, şi analog acelaşi număr $p$ de perechi de poli şi $a$ de perechi de căi de curent.

Calculul se poate duce pe baza a 2—3 variante, de dimensiuni diferite, aşa cum se procedează în mod normal la proiectarea oricărei maşini.

O dată alese dimensiunile principale urmează partea cea mai dificilă : calculul magnetic.

Acest calcul este principial diferit decît cel făcut la maşina de curent continuu normală, dat fiind faptul că inducţia în întrefier nu este uniformă şi că amperspirele, care creează cîmpul magnetic, nu sînt concentrate, ci distribuite la periferia unui cilindru.

Din aceste motive este nevoie de un calcul magnetic pe tuburi de forţă şi nu pe un pas polar, aşa cum se procedează în mod curent. În lucrare se indică o metodă suficient de precisă de calcul pe baza echivalării circuitului magnetic cu un circuit electric.

Ca de obicei, în circuitele electrice, se consideră cunoscute reluctanţele $R$ şi tensiunile magnetomotoare $U_{mi}$, care depind numai de numărul $N$ de conductoare de pe indus şi de curentul $I$ care le străbate ; necunoscutele problemei sînt fluxurile.

Dificultatea rezolvării circuitului constă în faptul că diferitele reluctanţe nu sînt liniare, în sensul că valoarea lor depinde de valoarea fluxului care le străbate. De aceea este necesară cunoaşterea curbelor de magnetizare al diferitelor materiale care intervin în alcătuirea circuitului magnetic şi calculul grafico-analitic.

Se remarcă deci că, spre deosebire de maşina normală, cînd calculul magnetic avea drept date de bază fluxul în întrefier şi drept scop evaluarea amperspirelor necesare creării acestui

flux, la mașina descrisă datele de bază sînt tocmai aceste amperspire și se evaluează prin calcul fluxul creat de ele.

Metoda expusă în lucrare se aplică întocmai în calculul magnetic al turboalternatorului. Se știe că metodele întrebuințate pentru acest calcul sînt foarte aproximative.

O dată făcut calculul magnetic și verificate dimensiunile alese inițial din acest punct de vedere, se trece la calculul comutației renunțîndu-se la calculul reacțiunii indusului care în cazul de față nu-și are rostul. Calculul comutației și al polilor auxiliari nu are nimic particular.

## IV. Studiul comparativ teoretic pentru o mașină de 10 kv — 220 V — 1100 rot/min

În lucrare este redat calculul amănunțit al unui motor clasic de curent continuu serie de 10 kW — 220 V— 1100 rot/min, precum și calculele pentru motoare de aceleași caracteristici, care funcționează după principiul expus în capitolul I. În cele ce urmează vom face comparație între aceste motoare în variantă și motorul clasic.

Mai întîi o comparație între dimensiunile geometrice (tabloul nr. 1).

*Tabloul nr. 1*

| | $D$ m | $L$ m | $\alpha_p$ | $\delta$ mm | $h_p$ m | $D_{js}$ m | $Z$ | $N$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Motor clasic . . . | 0,245 | 0,075 | 0,650 | 2,5 | 0,100 | 0,490 | 33 | 792 |
| Motor var. I. . . . | 0,295 | 0,095 | 0,375 | 0,4 | 0,065 | 0,475 | 35 | 840 |
| Motor var. II . . . | 0,295 | 0,090 | 0,400 | 0,4 | 0,065 | 0,485 | 33 | 792 |

Motoarele în variantă au pentru un rotor dimensiuni ($D$ diametrul; $L$ lungimea) mai mari și întrefier $\delta$ mult mai mic, limitat numai de considerente mecanice. Dat fiind faptul că înălțimea polului este mai mică, diametrul exterior $D_{js}$ al carcasei rezultă mai mic decît la motorul clasic. Motorul varianta II are un coeficient de acoperire al polului $\alpha_p = 0{,}4$, adică un coeficient limită (corespunzător $\alpha_p = 0{,}8$ în mașina clasică). Motorul varianta I are două crestături în plus și deci un număr de conductoare $N$ ceva mai mare.

În ceea ce privește încercările specifice, tabloul nr. 2 arată că inducția medie $B$ în întrefier este mai mare la motoarele în variantă fără să rezulte o mărire a inducției medii $B_{d2}$ în dinți (la mijlocul dinților). S-a păstrat pentru aceste motoare aceeași densitate de curent $j_a$ ca și pentru motorul clasic.

*Tabloul nr. 2*

| | $A$ A/m | $B$ Wb/m² | $B_{d2}$ Wb/m² | $j_a$ A/mm² |
|---|---|---|---|---|
| Motorul clasic . . . . | 28 200 | 0,715 | 1,52 | 4,80 |
| Motorul var. I . . . . | 25 400 | 0,810 | 1,51 | 4,88 |
| Motorul var.II . . . . | 23 900 | 0,850 | 1,54 | 4,88 |

La motoarele în variantă încărcarea liniară $A$ este mai mică.

Pentru comparația greutăților de cupru pentru înfășurări și fier servește tabloul nr. 3, în care s-a notat cu $G_{Cu}$, greutatea totală de cupru folosit în mașină, cu $G_{Cu_a}$, $G_{Cu_p}$, $G_{Cu_{pa}}$, greutatea de cupru pentru înfășurarea indusului, pentru înfășurarea polilor principali, respectiv a polilor auxiliari, iar cu $G_{Fe}$, greutatea totală de fier brut electrotehnic și $G_{Fe_a}$, $G_{Fe_p}$, greutatea de fier folosit pentru indus și pentru polii principali.

Se vede că motoarele în variantă conţin cu circa 25—30 % mai puţin cupru şi cu circa 12—15 % mai mult fier brut. Astfel, pentru varianta I este nevoie cu 10 kg cupru mai puţin şi cu 13 kg fier brut mai mult decît la motorul clasic. Cum un kg de cupru pentru înfăşurări echivalează ca preţ cu 6 kg fier electrotehnic activ (tablă), rezultă o micşorare a preţului de cost al materialelor active ale maşinii de 15 % în favoarea maşinii varianta I. Pentru maşina în varianta II economia este mai mare, de circa 20 %.

*Tabloul nr. 3*

| | $G_{Cua}$ kg | $G_{Cup}$ kg | $G_{Cupa}$ kg | $G_{Cu}$ kg | $G_{Fea}$ kg | $G_{Fep}$ kg | $G_{Fe}$ kg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Motor clasic . . . . . | 13,3 | 13,2 | 13,5 | 40,0 | 34,4 | 34,5 | 70 |
| Motor var. I . . . . . | 16,3 | — | 13,4 | 29,7 | 63,2 | 18,7 | 83 |
| Motor var. II . . . . . | 15,0 | — | 12,2 | 27,2 | 59,7 | 19,8 | 80 |

Dacă adăugăm economia de manoperă, care rezultă din cauza lipsei bobinelor de excitaţie de pe poli, balanţa este favorabilă maşinilor în variantă din punctul de vedere al preţului de cost.

Situaţia în privinţa pierderilor este arătată comparativ în tabloul nr. 4.

*Tabloul nr. 4*

| | $P_{Cu}$ W | $P_{Fe}$ W | $\Sigma P_i$ W | $\eta$ % |
|---|---|---|---|---|
| Motor clasic . . . . | 1530 | 300 | 2085 | 82,8 |
| Motor var. I . . . . | 1460 | 510 | 2225 | 81,8 |
| Motor var. II . . . . | 1380 | 545 | 2180 | 82,2 |

Se observă că pierderile în cupru la maşinile în variantă sînt ceva mai mici, în timp ce pierderile în fier cresc aşa cum s-a subliniat în studiul din capitolul II. Randamentul maşinilor în variantă este mai slab cu 1 %, respectiv 0,6 %.

Caracteristicile motoarelor în variantă sînt preferabile din două motive : *a*) la un acelaşi cuplu, motorul în variantă absoarbe un curent mai mic ; *b*) la aceleaşi cupluri mici motorul în variantă are viteze mai mici (ambalare mai puţin periculoasă).

### V. Studiul experimental asupra unui motor de 440 W — 56 V — 950 rot/min

În scopul de a verifica principiul de funcţionare şi metoda de calcul propusă, pentru a avea astfel o confirmare a studiului teoretic din capitolul precedent, s-a făcut şi un studiu experimental.

Acest lucru s-a putut face numai pe o maşină de putere mică fără poli auxiliari, de aproximativ 440 W — 56 V — 950 rot/min.

Pentru a ne da seama de utilitatea unei asemenea maşini am făcut o comparaţie cu motorul derivaţie de 310 W — 220 V — 950 rot/min din clasa ПН-52, de fabricaţie sovietică.

Tabloul nr. 5 furnizează baza pentru comparaţie.

*Tabloul nr. 5*

| | $P$ W | $D$ m | $L$ m | $G_{Cua}$ kg | $G_{Cup}$ kg | $G_{Cu}$ kg | $G_{Fea}$ kg | $G_{Fep}$ kg | $G_{Fe}$ kg | $\eta$ % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Motorul încercat . . | 440 | 0,114 | 0,10 | 2,24 | — | 2,24 | 10,6 | 5,5 | 16,1 | 66,3 |
| Motorul ПН-52 . | 300 | 0,098 | 0,09 | 1,00 | 1,85 | 2,85 | 7,0 | 10,5 | 17,5 | 65,0 |

Se remarcă imediat că la aproximativ aceeași greutate de fier brut folosit în mașină, greutatea de cupru este mai mică la motorul în variantă cu circa 20 % și totuși puterea dezvoltată de mașină, la o aceeași viteză de rotație, este cu circa 30 % mai mare (440 W — față de 300 W). Randamentul mașinii experimentale este ceva mai bun. Mașina a funcționat timp de o oră și jumătate în condițiile nominale fără să se încălzească peste limitele admisibile și fără să prezinte semnele unei comutații dificile, cu toate că axa periilor este așezată în muchea polilor ($\alpha_p = 0{,}50$, valoare limită).

Metoda de calcul propusă în capitolul III s-a verificat cu o mare precizie.

## CONCLUZII

Din studiul teoretic și experimental de mai sus rezultă că motoarele construite după principiul de funcționare expus pot concura cu succes motoarele normale. Ele prezintă avantajele următoare, care au fost subliniate în cursul expunerii :

*a*) cantitatea de cupru mai mică,

*b*) preț de cost mai mic,

*c*) caracteristici de funcționare ceva mai bune,

*d*) gabarite mai mici (îndeosebi diametrul exterior al carcasei) ;

iar ca dezavantaje :

*a*) un singur sens de rotație,

*b*) pierderi puțin mai mari,

*c*) necesită o atenție mai mare în tehnologia fabricației și la asamblare din cauza întrefierului mic.

*d*) funcționare necorespunzătoare în curent alternativ.

Avantajele sînt mai importante la mașini cu putere redusă, fără poli auxiliari, la care nici nu se pune problema inversării sensului de rotație.

Prin această lucrare credem că s-a adus o oarecare contribuție la calculul circuitelor magnetice în mașinile electrice (îndeosebi pentru turboalternatoare).

# REACTANȚA INVERSĂ A MAȘINII SINCRONE TRIFAZATE *)

DE

C. BĂLĂ

Lucrarea conține șase capitole, în care se determină expresiile reactanțelor inverse corespunzătoare regimurilor nesimetrice tipice, ale mașinii sincrone nesimetrice trifazate ideale. După ce se determină reactanțele inverse cunoscute în bibliografia publicată, se studiază două regimuri nesimetrice ale mașinii sincrone (nerezolvate pînă în prezent) : regimul de scurt circuit între faze, faza a treia fiind scurtcircuitată la nul și regimul de funcționare în sarcină trifazată nesimetrică, constituită din două reactanțe inductive $X$, egale, conectate între faze. Se descriu pe scurt metodele experimentale cunoscute, pentru determinarea reactanțelor inverse și se propun noi metode prin care se pot determina toate reactanțele inverse ale mașinii sincrone ; prin metodele date se pot determina și reactanțele supratranzitorii și reactanța homopolară la mașina sincronă trifazată. Metodele experimentale care se propun au fost aplicate la determinarea reactanțelor inverse ale unui generator sincron.

*) Autoreferat asupra lucrării de disertație susținută la 19 octombrie 1955.

## I. Introducere

Pentru studiul mașinii sincrone sînt necesare mai multe reactanțe definite corespunzător regimului de funcționare al mașinii.

Un sistem de curenți oarecare, de frecvență nominală din înfășurările indusului mașinii se poate descompune în trei sisteme de curenți, simetrice : unul de succesiune directă, altul de succesiune inversă, iar al treilea de succesiune nulă.

Sistemul de curenți de succesiune inversă produce un cîmp magnetic învîrtitor invers în raport cu sistemul de poli inductori. Corespunzător acestui cîmp magnetic invers se introduce o reactanță inversă.

La funcționarea mașinii sincrone în regim nesimetric, cîmpul magnetic invers depinde de valoarea reactanței inverse. Cîmpul magnetic invers induce tensiuni electromotoare în înfășurările rotorului și în polii inductori masivi, care provoacă o încălzire suplimentară a mașinii și o deformare a tensiunilor la borne și a intensităților curenților.

Ecuațiile tensiunilor mașinii sincrone în regim nesimetric, exprimate în componente simetrice, corespunzătoare frecvenței nominale, sînt simple : în aceste ecuații intervine și reactanța inversă a mașinii sincrone, care trebuie predeterminată.

Mașina sincronă nesimetrică — pentru care reactanțele supratranzitorii $X''_d$, $X''_q$ din axa longitudinală, respectiv transversală, sînt diferite — prezintă pentru fiecare regim nesimetric de funcționare o reactanță inversă diferită ; cîmpul magnetic învîrtitor invers este micșorat sau mărit, de cîmpul magnetic produs de armonica a treia de succesiune directă din intensitatea curentului prin înfășurările statorului.

În literatura publicată pînă în prezent, s-au determinat reactanțele inverse pentru : regimul de frînă asincronă, regimul de scurtcircuit bifazat, regimul de scurtcircuit monofazat și regimul de scurtcircuit a două faze la nul.

Obiectul lucrării este de a prezenta într-o formă matematică riguroasă și unitară determinarea reactanțelor inverse cunoscute în literatură, și de a analiza noi regimuri nesimetrice caracteristice, ale mașinii sincrone. Determinarea experimentală a reactanțelor inverse prin metodele cunoscute pînă în prezent este greoaie și parțial indirectă, cu excepția metodei scurtcircuitului bifazat dată de S. Bekku.

În lucrare se propun noi metode, pentru determinarea directă a reactanțelor inverse.

Se determină mai întîi intensitățile curenților prin metoda componentelor simetrice și intensitățile curenților în forma instantanee ; din expresiile acestora se deduce reactanța inversă corespunzătoare regimurilor tipice ale mașinii sincrone.

## II. Determinarea intensităților curenților din indusul mașinii sincrone prin metoda componentelor simetrice

Din ecuațiile tensiunilor mașinii sincrone exprimate în componente simetrice și din ecuațiile corespunzătoare regimului de funcționare al mașinii sincrone, se deduc componentele fundamentale ale intensităților, în funcție de tensiunea electromotoare $\overline{E}$ indusă în stator la funcționarea în gol și în funcție de impedanța directă $\overline{Z}_1$, impedanța inversă $\overline{Z}_2$ și impedanța homopolară $\overline{Z}_0$ a mașinii sincrone.

Se determină intensitățile curenților pentru următoarele regimuri : scurtcircuit între două faze, scurtcircuit indepedent al unei faze, scurtcircuit a două faze la nul, scurtcircuit între două faze simultan cu scurtcircuitul fazei a treia la nul. Se determină intensitățile curenților și pentru funcționarea mașinii sincrone în sarcină nesimetrică formată din două impedanțe $\overline{Z}_b$, $\overline{Z}_c$, conectate între fazele $A-B$, respectiv $A-C$ ale mașinii.

### III. Ecuațiile tensiunilor mașinii sincrone

Se consideră mașina sincronă ideală, trifazată, prevăzută cu înfășurări amortizoare în axa longitudinală și în axa transversală a polilor inductori. Se presupune că rotorul se învîrtește cu turație constantă.

Se stabilesc ecuațiile tensiunilor instantanee, în funcție de inductanțele proprii și mutuale ale circuitelor electrice din mașină.

Pentru rezolvarea sistemului format din șase ecuații, se folosește calculul operațional. Prin aplicarea transformării Laplace, se pot elimina curenții ce trec prin circuitele rotorului din ecuațiile tensiunilor pentru circuitele din stator; astfel se obține un sistem de trei ecuații în care necunoscutele sînt tensiunile la bornele fazelor $\widetilde{u}_a$, $\widetilde{u}_b$, $\widetilde{u}_c$ și intensitățile curenților $\widetilde{i}_a$, $\widetilde{i}_b$, $\widetilde{i}_c$.

Prin transformarea mărimilor electrice de fază în componentele $\alpha$, $\beta$, 0 se ajunge la un sistem de trei ecuații în care necunoscutele sînt: $\widetilde{u}_\alpha$, $\widetilde{u}_\beta$, $\widetilde{u}_0$, $\widetilde{i}_\alpha$, $\widetilde{i}_\beta$, $\widetilde{i}_0$. În ecuațiile obținute intervin reactanțele operaționale $\widetilde{X}_d$, $\widetilde{X}_q$ și reactanța homopolară $\widetilde{X}_0$ ale mașinii sincrone, care sînt funcții de inductanțele proprii și mutuale ale circuitelor din mașină și de variabila $p$ (de la transformarea Laplace).

Ecuațiile tensiunilor în forma operațională, în componentele $\alpha$, $\beta$, 0, date de Y. K. Ching și B. Adkins *), sînt

$$
\begin{array}{c|l}
\alpha & -\widetilde{u}_\alpha(p)+\widetilde{e}_\alpha(p)-\frac{1}{2}p\left[e^{-j2\lambda}\widetilde{L}_D(p+j\omega)\,\widetilde{i}_\alpha(p+j2\omega)+\text{conj}\right]- \\
 & \qquad -\frac{1}{2}p\left[je^{-j2\lambda}\widetilde{L}_D(p+j\omega)\,\widetilde{i}_\beta(p+j2\omega)+\text{conj}\right] \\
\hline
\beta & -\widetilde{u}_\beta(p)+\widetilde{e}_\beta(p)-\frac{1}{2}p\left[je^{-j2\lambda}\widetilde{L}_D(p+j\omega)\,\widetilde{i}_\alpha(p+j2\omega)+\text{conj}\right]+ \\
 & \qquad +\frac{1}{2}p\left[e^{-j2\lambda}\widetilde{L}_D(p+j\omega)\,\widetilde{i}_\beta(p+j2\omega)+\text{conj}\right] \\
\hline
0 & -\widetilde{u}_0(p)
\end{array}
=
$$

$$
=
\begin{array}{c|c|c|c}
 & \alpha & \beta & 0 \\
\hline
\alpha & r_a+\frac{1}{2}p\left[\widetilde{L}_s(p+j\omega)+\text{conj}\right] & -\frac{1}{2}p\left[j\widetilde{L}_s(p+j\omega)+\text{conj}\right] & 0 \\
\hline
\beta & \frac{1}{2}p\left[j\widetilde{L}_s(p+j\omega)+\text{conj}\right] & r_a+\frac{1}{2}p\left[\widetilde{L}_s(p+j\omega)+\text{conj}\right] & 0 \\
\hline
0 & 0 & 0 & r_a+pL_0
\end{array}
\times
\begin{array}{c|c}
 & \\
\hline
\alpha & \widetilde{i}_\alpha(p) \\
\hline
\beta & \widetilde{i}_\beta(p) \\
\hline
0 & \widetilde{i}_0(p)
\end{array}
$$

unde $\widetilde{e}_\alpha$, $\widetilde{e}_\beta$ sînt transformatele Laplace ale componentelor $\alpha$ și $\beta$ ale tensiunilor induse în înfășurările statorului la funcționarea în gol a mașinii

$$\widetilde{L}_d(p)=\frac{1}{2}\left[\widetilde{L}_d(p)-\widetilde{L}_q(p)\right] \quad \text{și} \quad \widetilde{L}_s(p)=\frac{1}{2}\left[\widetilde{L}_d(p)+\widetilde{L}_q(p)\right],$$

*) Y. K. Ching a. B. Adkins, *Transient Theorie of Synchronous Generators under Unbalanced Conditions*. The Proc. of Inst., of. El. Eng., 1954, part, IV, p. 166.

iar

$\omega \widetilde{L}_d(p)$ — reactanţa operaţională din axa longitudinală;

$\omega \widetilde{L}_q(p)$ — reactanţa operaţională din axa transversală;

$\omega \widetilde{L}_0 = x_0$ — reactanţa homopolară;

$\lambda$ — unghiul în momentul iniţial dintre axa polilor inductori şi dintre axa înfăşurării fazei $A$ din stator.

Celelalte trei ecuaţii necesare pentru determinarea completă a acestor necunoscute se deduc în funcţie de circuitul exterior al maşinii.

## IV. Tensiunile şi curenţii maşinii sincrone trifazate în regimuri tipice

Din ecuaţiile tensiunilor maşinii sincrone şi din ecuaţiile pentru circuitul receptor, se determină intensităţile curenţilor şi tensiunile la bornele înfăşurării statorului în regim permanent pentru următoarele cazuri:

1. Maşina funcţionează în regim de frînă asincronă.

*a*) Intensităţile curenţilor prin înfăşurările statorului variază sinusoidal în timp,

$$i_a = I_{m1} \sin \omega t; \quad i_b = I_{m1} \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right); \quad i_c = I_{m1} \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right).$$

Tensiunea la bornele fazei $A$ este

$$u_a = r_a I_{m1} \sin \omega t + \frac{X_d'' + X_q''}{2} I_{m1} \cos \omega t + 3 \frac{X_d'' - X_q''}{2} I_{m1} \cos 3\omega t, \tag{1}$$

unde

$X_d''$ este reactanţa supratranzitorie longitudinală,

$X_q''$ este reactanţa supratranzitorie transversală.

*b*) Tensiunile aplicate la bornele fazelor variază sinusoidal în timp,

$$u_a = r_a I_{m1} \sin \omega t + 2 \frac{X_d'' - X_q''}{X_d'' + X_q''} I_{m1} \cos \omega t,$$

iar intensitatea curentului prin faza $A$ este

$$i_a = I_{m1} \sin \omega t + \frac{X_d'' - X_q''}{X_d'' + X_q''} I_{m1} \sin 3\omega t. \tag{2}$$

2. Scurtcircuit între fazele $B$ şi $C$.

Intensitatea curentului prin fazele scurtcircuitate este

$$i_b = -i_c = \frac{E_m \sqrt{3}}{X_d + \sqrt{X_d'' X_q''}} \sum_{\nu} b_{LL}^{\nu-1} \sin (2\nu - 1)\, \omega t, \tag{3}$$

unde $E_m$ este valoarea maximă a tensiunii induse la funcţionarea în gol a maşinii,

$$b_{LL} = \frac{\sqrt{X_d''} - \sqrt{X_q''}}{\sqrt{X_d''} + \sqrt{X_q''}},$$

$X_d$ este reactanţa sincronă longitudinală.

Tensiunile la bornele fazelor sînt

$$u_b = u_c = -\frac{1}{2}u_a = -\frac{E_m\sqrt{X_d''X_q''}}{X_d+\sqrt{X_d''X_q''}}\sum_{\nu}(2\nu-1)\,b_{LL}^{\nu-1}\sin(2\nu-1)\,\omega t. \tag{4}$$

3. Scurtcircuit independent al fazei $A$.

Intensitatea curentului prin faza $A$ scurtcircuitată este

$$i_a = \frac{3E_m}{X_d+\frac{X_0}{2}+\sqrt{\left(X_d''+\frac{X_0}{2}\right)\left(X_q''+\frac{X_0}{2}\right)}}\sum_{\nu}b_{L0}^{\nu-1}\sin(2\nu-1)\,\omega t. \tag{5}$$

Tensiunile la bornele fazelor libere sînt

$$u_b = \frac{E_m}{X_d+\frac{X_0}{2}+\sqrt{\left(X_d''+\frac{X_0}{2}\right)\left(X_q''+\frac{X_0}{2}\right)}}\left[-\frac{3}{2}X_0\sum_{\nu}(2\nu-1)\,b_{L0}^{\nu-1}\cos(2\nu-1)\,\omega t+\right.$$

$$\left.+\sqrt{3}\sqrt{\left(X_d''+\frac{X_0}{2}\right)\left(X_q''+\frac{X_0}{2}\right)}\sum_{\nu}(2\nu-1)\,b_{L0}^{\nu-1}\sin(2\nu-1)\,\omega t\right],$$

$$u_c = \frac{-E_m}{X_d+\frac{X_0}{2}+\sqrt{\left(X_d''+\frac{X_0}{2}\right)\left(X_q''+\frac{X_0}{2}\right)}}\left[\frac{3}{2}X_0\sum_{\nu}(2\nu-1)\,b_{L0}^{\nu-1}\cos(2\nu-1)\,\omega t+\right.$$

$$\left.+\sqrt{3}\sqrt{\left(X_d''+\frac{X_0}{2}\right)\left(X_q''+\frac{X_0}{2}\right)}\sum_{\nu}(2\nu-1)\,b_{L0}^{\nu-1}\sin(2\nu-1)\,\omega t\right],$$

unde

$$b_{L0} = \frac{\sqrt{X_d''+\frac{X_0}{2}}-\sqrt{X_q''+\frac{X_0}{2}}}{\sqrt{X_d''+\frac{X_0}{2}}+\sqrt{X_q''+\frac{X_0}{2}}}.$$

4. Scurtcircuit independent al fazelor $B$ şi $C$.

Intensităţile curenţilor prin fazele scurtcircuitate sînt

$$\left.\begin{aligned}
i_b &= \frac{E_m\left[-3\sqrt{X_d''X_q''}\sum_{\nu}b_{LL0}^{\nu-1}\cos(2\nu-1)\,\omega t\right.}{(X_d+2X_0)\sqrt{X_d''X_q''}+X_d\sqrt{(X_d''+2X_0)(X_q''+2X^0)}}+\\
&\quad\left.+\sqrt{3}\sqrt{(X_d''+2X_0)(X_q''+2X_0)}\sum_{\nu}b_{LL0}^{\nu-1}\sin(2\nu-1)\,\omega t\right]\\
&\quad+\frac{}{(X_d+2X_0)\sqrt{X_d''X_q''}+X_d\sqrt{(X_d''+2X_0)(X_q''+2X_0)}},\\
i_c &= \frac{-E_m\left[3\sqrt{X_d''X_q''}\sum_{\upsilon}b_{LL0}^{\upsilon-1}\cos(2\nu-1)\,\omega t\right.}{(X_d+2X_0)\sqrt{X_d''X_q''}+X_d\sqrt{(X_d''+2X_0)(X_q''+2X_0)}}+\\
&\quad\left.+\sqrt{3}\sqrt{(X_d''+2X_0)(X_q''+2X_0)}\sum_{\upsilon}b_{LL0}^{\upsilon-1}\sin(2\nu-1)\,\omega t\right]\\
&\quad+\frac{}{(X_d+2X_0)\sqrt{X_d''X_q''}+X_d\sqrt{(X_d''+2X_0)(X_q''+2X_0)}},
\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

unde

$$b_{LL0} = \frac{\sqrt{2X_0 X_d'' + X_d'' X_q''} - \sqrt{2X_0 X_q'' + X_d'' X_q''}}{\sqrt{2X_0 X_d'' + X_d'' X_q''} + \sqrt{2X_0 X_q'' + X_d'' X_q''}}.$$

5. Scurtcircuit între fazele $B$ și $C$ simultan cu scurtcircuitul independent al fazei $A$. Intensitățile curenților prin faza $A$, respectiv prin fazele $B$, $C$ sînt

$$\left.\begin{aligned} i_a &= \frac{3E_m \sqrt{X_d'' X_q''}}{\left(X_d + \frac{X_0}{2}\right)\sqrt{X_d'' X_q''} + X_d \sqrt{\left(X_d + \frac{X_0}{2}\right)\left(X_q'' + \frac{X_0}{2}\right)}} \sum_{\nu} b_{LL,L0}^{\nu-1} \cos(2\nu-1)\,\omega t, \\ i_b &= \frac{\sqrt{3}\,E_m \sqrt{\left(X_d'' + \frac{X_0}{2}\right)\left(X_q'' + \frac{X_0}{2}\right)}}{\left(X_d + \frac{X_0}{2}\right)\sqrt{X_d'' X_q''} + X_d \sqrt{\left(X_d'' + \frac{X_0}{2}\right)\left(X_q'' + \frac{X_0}{2}\right)}} \sum_{\nu} b_{LL,L0}^{\nu-1} \sin(2\nu-1)\,\omega t, \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

unde

$$b_{LL,L0} = \frac{\sqrt{\frac{X_0}{2} X_d'' + X_d'' X_q''} - \sqrt{\frac{X_0}{2} X_q'' + X_d'' X_q''}}{\sqrt{\frac{X_0}{2} X_d'' + X_d'' X_q''} + \sqrt{\frac{X_0}{2} X_q'' + X_d'' X_q''}}.$$

6. Mașina sincronă funcționează în sarcină nesimetrică constituită din două reactanțe inductive $X$ egale, conectate între fazele $A - B$, respectiv $A - C$ ale mașinii sincrone. Acesta este cazul funcționării mașinii sincrone conectate în sarcină inductivă printr-un transformator în triunghi deschis, sau conectată la un transformator $Dy$, avînd scurtcircuit dublu la nul, pe partea secundară.

Intensitățile curenților prin înfășurările indusului sînt

$$i_a = i_\alpha \; ; \quad i_b = -\frac{1}{2} i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta \; ; \quad i_c = -\frac{1}{2} i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta,$$

unde

$$\left.\begin{aligned} i_\alpha &= \frac{2E_m \sqrt{(X_d'' + X)(X_q'' + X)}}{\left(X_d + \frac{X}{3}\right)\sqrt{(X_d'' + X)(X_q'' + X)} + (X_d + X)\sqrt{\left(X_d'' + \frac{X}{3}\right)\left(X_q'' + \frac{X}{3}\right)}} \sum_{\nu} b^{\nu-1} \cos(2\nu-1)\,\omega t, \\ i_\beta &= \frac{2E_m \sqrt{\left(X_d'' + \frac{X}{3}\right)\left(X_q'' + \frac{X}{3}\right)}}{(X_d + X)\sqrt{\left(X_d'' + \frac{X}{3}\right)\left(X_q'' + \frac{X}{3}\right)} + \left(X_d + \frac{X}{3}\right)\sqrt{(X_d'' + X)(X_q'' + X)}} \sum_{\nu} b^{\nu-1} \sin(2\nu-1)\,\omega t, \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

iar

$$b = \frac{\sqrt{(X + X_d'')\left(\frac{X}{3} + X_q''\right)} - \sqrt{\left(\frac{X}{3} + X_d''\right)(X + X_q'')}}{\sqrt{(X + X_d'')\left(\frac{X}{3} + X_q''\right)} + \sqrt{\left(\frac{X}{3} + X_d''\right)(X + X_q'')}}.$$

### V. Determinarea expresiilor reactanţelor inverse ale maşinii sincrone

Reactanţa inversă a maşinii sincrone nesimetrice, pentru diferitele regimuri, se determină din raportul valorilor efective ale fundamentalelor tensiunilor (în cuadratură cu intensitatea curentului) şi intensităţii curentului, de succesiune inversă; expresia reactanţei inverse se poate obţine şi prin comparaţia intensităţii curentului, determinată prin componente simetrice, cu armonica fundamentală a intensităţii curentului instantaneu.

Expresiile reactanţelor inverse, obţinute, sînt date în tabloul alăturat.

*Tablou*

| Regimul de funcţionare al maşinii sincrone | Reactanţa inversă |
|---|---|
| 1) Regim de frînă asincronă (intensităţile curenţilor variază sinusoidal în timp | $X_{2I} = \dfrac{X''_d + X''_q}{2}$ |
| 2) Scurtcircuit independent al unei faze | $X_{2,L_0} = \sqrt{\left(X''_d + \dfrac{X_0}{2}\right)\left(X''_q + \dfrac{X_0}{2}\right)} - \dfrac{X_0}{2}$ |
| 3) Scurtcircuit între două faze | $X_{2,LL} = \sqrt{X''_d X''_q}$ |
| 4) Scurtcircuit independent a două faze | $X_{2,LL_0} = \dfrac{2X_0\sqrt{X''_d X''_q}}{\sqrt{(2X_0 + X''_d)(2X_0 + X''_q)} - \sqrt{X''_d X''_q}}$ |
| 5) Scurtcircuit între două faze simultan cu scurtcircuitul independent al fazei a treia | $X_{2,LL,L_0} = \dfrac{\dfrac{X_0}{2}\sqrt{X''_d X''_q}}{\sqrt{\left(\dfrac{X_0}{2} + X''_d\right)\left(\dfrac{X_0}{2} + X''_q\right)} - \sqrt{X''_d X''_q}}$ |
| 6) La bornele maşinii este conectată în „V" o sarcină nesimetrică inductivă | $X_{2S} = \dfrac{\sqrt{\left(X''_d + \dfrac{X}{3}\right)\left(X''_q + \dfrac{X}{3}\right)} - \dfrac{1}{3}\sqrt{(X''_d + X)(X''_q + X)}}{\sqrt{(X''_d + X)(X''_q + X)} - \sqrt{\left(X''_d + \dfrac{X}{3}\right)\left(X''_q + \dfrac{X}{3}\right)}}$ |
| 7) Regim de frînă asincronă (tensiunile la bornele maşinii variază sinusoidal în timp) | $X_{2II} = \dfrac{2X''_d X''_q}{X''_d + X''_q}$ |

Reactanţele $X_{2,LL,L0}$ şi $X_{2S}$ se stabilesc în lucrare pentru prima dată.

Concluziile importante sînt următoarele:

— Reactanţa inversă a maşinii sincrone trifazate nesimetrice, în regim permanent şi nesimetric de funcţionare, depinde de reactanţele supratranzitorii $X''_d$ şi $X''_q$ (respectiv de reactanţa tranzitorie $X'_d$ şi reactanţa sincronă transversală $X_q$ la maşinile fără înfăşurări amortizoare), de reactanţa homopolară $X_0$ şi de impedanţele circuitului receptor.

— Valoarea maximă a reactanţei inverse — în raport cu regimurile studiate — la o aceeaşi maşină, corespunde funcţionării maşinii ca frînă asincronă conectată la o astfel de

sursă, încît intensităţile curenţilor în stator variază sinusoidal în timp şi formează un sistem de succesiune inversă; reactanţa inversă $X_{2I}$ în acest caz, este media aritmetică a reactanţelor supratranzitorii.

Valoarea minimă a reactanţei inverse la o aceeaşi maşină, corespunde funcţionării maşinii ca frînă asincronă, conectată la o sursă trifazată de tensiuni sinusoidale; reactanţa inversă $X_{2II}$ în acest caz este media armonică a reactanţelor supratranzitorii.

Deci

$$\frac{2X_d'' \cdot X_q''}{X_d'' + X_q''} \leqslant X_2 \leqslant \frac{X_d'' + X_q''}{2}.$$

Dacă raportul reactanţelor supratranzitorii $\frac{X_q''}{X_d''}$ variază de la o maşină la alta între valorile 1 şi 8, raportul dintre valoarea maximă $X_{2I}$ şi valoarea minimă $X_{2II}$ a reactanţei inverse variază astfel

$$1 \leqslant \frac{X_{2I}}{X_{2II}} \leqslant 2{,}5.$$

— Maşina sincronă trifazată simetrică are reactanţele supratranzitorii egale: $X_d'' = X_q''$. Reactanţa inversă a maşinii sincrone este constantă în oricare sarcină nesimetrică şi este egală cu reactanţa supratranzitorie $X_2 = X_d''$.

— La folosirea ecuaţiilor tensiunilor maşinii sincrone nesimetrice, în coordonatele simetrice 0, 1, 2, trebuie considerată reactanţa inversă corespunzătoare fiecărui regim. Dificultatea pe care o introduce această schimbare a reactanţei inverse în funcţie de regimul de funcţionare, nu se poate evita prin alegerea unui alt sistem de referinţă.

— Reactanţele inverse ale aceleiaşi maşini se pot grupa într-o ordine descrescătoare, ca în tabloul dat, cu excepţia reactanţei inverse $X_{2S}$, care depinde de reactanţa externă $X$.

## VI. Determinarea experimentală a reactanţelor inverse

În lucrare se prezintă mai întîi metodele de determinare experimentală a reactanţelor inverse cunoscute pînă în prezent.

Reactanţa inversă corespunzătoare unui regim de funcţionare a unei maşini sincrone date, se poate calcula dacă se cunosc reactanţele supratranzitorii $X_d''$ şi $X_q''$, reactanţa homopolară $X_0$ şi reactanţa circuitului exterior. Această metodă indirectă de determinare a reactanţei inverse implică predeterminarea experimentală a reactanţelor supratranzitorii şi a reactanţei homopolare.

Din încercarea maşinii în regim de frînă asincronă se pot determina reactanţele inverse $X_{2I}$ şi $X_{2II}$, prin măsurarea tensiunilor curenţilor şi a puterii luate de maşină de la reţea, iar din oscilograma tensiunii, respectiv a intensităţii curentului, se determină raportul dintre armonica de ordinul trei şi fundamentală.

Metoda necesită o sursă externă de tensiune variabilă ca formă şi ca valoare efectivă; dezavantajul metodei constă şi în folosirea oscilogramelor pentru determinarea raportului armonicelor.

— Metoda scurtcircuitului între două faze dată de S. Bekku *). Din încercarea maşinii în scurtcircuit bifazat, prin măsurarea intensităţii curentului şi a unei *puteri fictive* (cu un

*) M. P. Kostenko, *Elektriceskie maşinî (speţialnaia ceasl)*. Gosenergoizdat, Moscova, 1949.

wattmetru conectat astfel : la bornele bobinei de tensiune se aplică tensiunea dintre faza liberă şi una din fazele scurtcircuitate, iar bobina de curent este străbătută de curentul prin fazele scurtcircuitate) se poate determina reactanţa inversă $X_{2I}$.

$$X_{2I} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot I^2}, \tag{9}$$

unde

$S$ este puterea fictivă măsurată de wattmetru,

$I$ este intensitatea curentului prin fazele scurtcircuitate.

În lucrare se propun trei metode originale pentru determinarea directă a reactanţelor $X_{2,LO}$, $X_{2,LLO}$, $X_{2,LL,LO}$. Din încercarea maşinii sincrone în scurtcircuit monofazat şi bifazat se poate determina şi reactanţa homopolară $X_0$. Prin metodele propuse şi metoda scurtcircuitului bifazat se pot determina şi reactanţele supratranzitorii.

— Metoda scurtcircuitului independent al unei faze. Prin încercarea în scurtcircuit monofazat şi bifazat se poate determina reactanţa homopolară

$$X_0 = \frac{\sqrt{3}\, S}{I^2} - 2X_{2I},$$

unde

$S$ este *puterea fictivă* măsurată de wattmetru (conectat astfel : la bornele de tensiune se aplică tensiunea între fazele libere, iar bobina de curent este străbătută de curentul din faza scurtcircuitată),

$I$ este intensitatea curentului prin faza scurtcircuitată,

$X_{2I}$ este reactanţa inversă determinată prin metoda scurtcircuitului bifazat.

Reactanţa $X_{2,LO}$ se determină din valoarea efectivă a tensiunii $U_b$ $U_c$, de la bornele fazelor libere şi din valoarea efectivă a tensiunii $U_{bc}$ dintre faze

$$X_{2,LO} = \frac{X_0}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{4\sqrt{\left(\frac{U_b}{U_{bc}}\right)^2 - 1}}. \tag{10}$$

— Metoda scurtcircuitului independent a două faze. La încercarea maşinii sincrone în scurtcircuit între două faze şi la nul, se măsoară intensităţile curenţilor prin fazele scurtcircuitate ($I_b = I_c$) şi intensitatea curentului prin conductorul comun de scurtcircuitare la nul ($I_d$). Reactanţa inversă corespunzătoare acestui regim, se determină din

$$X_{2,LLO} = 2X_0 \frac{1}{\sqrt{3}\sqrt{4\left(\frac{I_b}{I_d}\right)^2 - 1} - 1}. \tag{11}$$

— Metoda scurtcircuitului între două faze, iar faza a treia scurticircuitată la nul. În acest caz se măsoară intensitatea curentului prin fazele scurtcircuitate între ele ($I_b = I_c$) şi intensitatea curentului prin faza scurtcircuitată la nul ($I_a$).

Reactanţa inversă $X_{2,LL,LO}$ se determină astfel

$$X_{2,LL,LO} = \frac{X_0}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}\,\frac{I_b}{I_c} - 1}. \tag{12}$$

— Determinarea reactanţelor supratranzitorii. Din încercarea maşinii în scurtcircuit bifazat se determină semisuma reactanţelor supratranzitorii (9). Din încercarea maşinii în

scurtcircuit monofazat și scurtcircuit între două faze, faza a treia fiind conectată la nul, se determină media geometrică a reactanțelor supratranzitorii

$$X_{2,LL} = \frac{\frac{X_0}{2}}{2\frac{I_b}{I_a}\sqrt{\left(\frac{U_b}{U_{bc}}\right)^2 - \frac{1}{4}}}, \tag{13}$$

unde

$\frac{I_b}{I_a}$ este raportul curenților de la încercarea în scurtcircuit între două faze simultan cu faza a treia conectată la nul,

$\frac{U_b}{U_{bc}}$ este raportul tensiunilor la borne, de la încercarea mașinii în scurtcircuit monofazat.

Din media aritmetică și din media geometrică a reactanțelor supratranzitorii se pot calcula reactanțele $X_d''$ și $X_q''$.

— Reactanța inversă corespunzătoare regimului de sarcină nesimetrică inductivă constituită din două reactanțe egale conectate în „V" se poate determina experimental prin metoda propusă de I. A. Sîromiatnikov *); această metodă este dedusă în lucrare pentru mașina sincronă ideală nesimetrică.

În lucrare se dau rezultatele experimentale obținute la încercarea unei mașini sincrone de 150 kVA.

Concluziile importante relativ la determinarea experimentală a reactanțelor inverse sînt următoarele:

*a*) Determinarea reactanțelor inverse — din încercarea mașinilor sincrone în scurtcircuite nesimetrice — prezintă anumite avantagii:

— metodele directe sînt mai precise, fiindcă nu folosesc rezultate determinate din oscilograme (a căror prelucrare introduce erori);

— la încercarea mașinii în scurtcircuite nesimetrice nu este necesară o sursă trifazată externă de tensiune variabilă și formă cunoscută.

*b*) Metodele originale — care se propun în lucrare au fost stabilite în ipoteza că rezistența înfășurărilor indusului este mică în raport cu reactanțele supratranzitorii și reactanța homopolară; deci metodele dau rezultate reale la mașinile de puteri mari care satisfac această condiție.

*c*) Prin metodele propuse și metoda dată de S. Bekku se pot calcula reactanțele supratranzitorii ale mașinii sincrone; se evită astfel erorile mari care însoțesc metoda statică și se evită prelucrarea oscilogramelor ridicate la încercarea mașinii în scurtcircuit trifazat instantaneu.

*d*) Determinarea reactanței homopolare din încercarea mașinii sincrone la scurtcircuit bifazat și monofazat se aplică atît la mașinile mici, cît și la mașinile de putere mare; metoda este corectă — fiind dedusă pentru mașina sincronă nesimetrică (care are reactanțele supratranzitorii $X_d'' \neq X_q''$) — și este practică, fiindcă nu folosește o sursă externă de tensiune sinusoidală.

*) I. A. Sîromeatnikov, *Rejimî raboti sinhronnîh generatorov* Gosenergoizdat, Moscova, 1952.

OBERING W. SCHOLL, *Anhaltszahlen über den Elektrizitäts — Kraft — und Wärmebedarf der Industrie* (Indicii de consum de energie electrică, forţă şi căldură în industrie). Frankfurt a.M., 1951, 410 pag.

După cum spune şi titlul, lucrarea este o culegere sistematizată de date din toate ramurile industriale.

Datele sînt extrase din literatura de specialitate şi din anchete întreprinse de diferite întreprinderi de electricitate din vestul Europei şi din S.U.A.

Fiecare industrie se tratează detaliat, indicîndu-se nu numai indicii de consum de energie electrică, forţă şi căldură, dar şi folosirea altor feluri de energie, indici de producţie, necesarul de materie primă, procese tehnologice etc. În felul acesta cititorul poate cunoaşte toate datele caracteristice unei industrii.

În afară de aceasta, pentru foarte multe industrii se dau comparaţii tehnico-economice, se analizează critic indicii de producţie şi de consum pentru diverse industrii de acelaşi gen şi se dau date asupra dinamicii creşterii consumului şi producţiei.

Astfel, se compară o fabrică de hîrtie din Romînia cu una din S.U.A., furnale electrice din Germania, Suedia şi Italia etc.

Întreg materialul este prezentat în formă sistematică, clasificarea ramurilor industriale şi industriilor fiind făcută prin clasificare zecimală.

Toate ramurile industriale sînt împărţite în 7 grupe :

1. minerit, siderurgie şi industrie grea ;
2. industria metalurgică prelucrătoare, industria electrică, mecanica fină, optică ;
3. roci şi pămînturi, materiale de construcţie, ceramică, sticlă, lemn ;
4. produse chimice ;
5. materiale fibroase şi hîrtie ;
6. piei, piele şi textile ;
7. industria alimentară şi de consum.

Fiecare din aceste grupe este la rîndul ei subdivizată pe grupe de industrii similare ca materie primă folosită sau ca produs finit.

Astfel grupa 4 — produse chimice — se subdivide, în funcţie de materia primă folosită, în 7 subgrupe :

41. carbonul şi combinaţiile sale organice ;
42. siliciul ;
43. azotul şi combinaţii de azot ;
44. fosforul, sulful, clorul şi combinaţiile lor ;
45. oxigenul, hidrogenul şi combinaţiile lor ;
46. uleiuri şi grăsimi ;
47. cauciuc şi produse de cauciuc, vopsele şi lacuri.

Grupa 5 — materiale fibroase şi hîrtie — se subdivide în funcţie de produsul finit în 4 subgrupe :

51. materiale fibroase ;
52. hîrtie ;
53. mucavale şi cartoane ;
54. produse de hîrtie.

La rîndul lor, aceste subgrupe se divid mai departe. Astfel grupa 51 — materiale fibroase — se subdivide în 4 grupe :

511. materie primă din fibre ;
512. materie primă din cîrpe ;

513. materie primă din paie;
514. materie primă din lemn.

Şi aceste grupe se divid mai departe după metodele de fabricaţie. Grupa 514 — materie primă din lemn — se subdivide în:

514 — 1 celuloză natron;
514 — 2 celuloză sulfat;
514 — 3 celuloză sulfit.

La fiecare din aceste grupe se dau apoi toate datele de fabricaţie şi consum: cantitatea şi calitatea materiei prime, procesele tehnologice folosite, consumul de energie electrică, aburi, apă şi combustibil.

Se scot la iveală şi se analizează cifrele de consum şi producţie ale principalelor agregate mari consumatoare de energie.

Cifrele de consum şi producţie sînt date în funcţie de diversele sortimente de producţie finită (celuloză nealbită, albită, pentru vîscoză etc.).

Se dau indicaţii pentru economia de combustibil şi energie, de recuperare a deşeurilor de producţie şi asupra posibilităţilor de realizare.

Lucrarea mai are un capitol special de bibliografie. Numărul foarte mare de surse bibliografice indicate este grupat după aceeaşi clasificare, ceea ce uşurează mult folosirea ei.

Prin faptul că lucrarea îmbrăţişează toate ramurile industriale şi cuprinde date complete atît asupra consumului, cît şi asupra proceselor tehnologice, precum şi prin analiza critică comparativă şi datele asupra dinamicii dezvoltării diverselor industrii şi a creşterii producţiei şi consumului, ea interesează un cerc foarte larg de cititori, îndeosebi pe energeticienii din industrii, putînd fi un îndreptar preţios pentru studii de reducere a consumurilor specifice şi pentru normare.

Cu toate acestea, nu trebuie însă să se piardă din vedere două fapte, care diminuează întrucîtva valoarea lucrării şi reclamă o oarecare prudenţă la folosirea şi interpretarea datelor pe care le cuprinde.

Este vorba în primul rînd de faptul că indicaţiile bibliografice cele mai recente sînt din anul 1940, deci nu cuprind ultimii 15 ani, în care tehnica industrială a făcut progrese mari, ceea ce face ca unele din date să nu mai fie actuale.

Apoi în lucrare nu este inclusă industria Uniunii Sovietice şi aceasta constituie lipsa principală a lucrării. Într-adevăr, creşterea impetuoasă a industriei şi îndeosebi gradul înalt de dezvoltare şi nivelul ştiinţific ridicat al energeticii sovietice nu îngăduie neglijarea lor şi fac ca orice dată de consum sau cifrele de comparaţie să nu fie complet valabile.

În concluzie, lucrarea poate fi recomandată spre folosire, datele cuprinse în ea trebuind însă să fie privite în mod critic şi în lumina realizărilor din ultimii 15 ani din lumea întreagă şi îndeosebi a realizărilor din industria şi energetica sovietică.

*M. Biener*

G. K. FILOMENKO şi P. D. LEBEDEV, *Instalaţii de uscare*. Ed. energetică de stat, Bucureşti, 1954, 380 pag.

Cartea este destinată să servească drept manual pentru cursul *Instalaţii de uscare* şi este alcătuită în conformitate cu programa pentru specialitatea *Termotehnica industrială* a institutelor de energetică. Ea poate fi utilizată şi de personalul tehnic şi ingineresc al întreprinderilor industriale de specialitate.

În această carte sînt expuse problemele generale ale teoriei uscării şi ale proiectării raţionale, ale construcţiei şi ale exploatării diferitelor instalaţii de uscare.

Sînt examinate de asemenea diferitele procedee de uscare a materialelor: prin convecţie, contact, radiaţie, uscare prin curenţi de înaltă frecvenţă, uscare prin sublimare etc. Se fac aprecieri asupra procedeelor de uscare, indicîndu-se domeniul lor de utilizare, se dau scheme, construcţii de uscătorie şi o descriere a utilajului lor auxiliar.

În ansamblu cartea cuprinde trei părţi:

Partea I — *Teoria şi calculul procesului de uscare.*
Partea a II-a —*Construcţiile şi aparatajul instalaţiilor de uscare.*
Partea a III-a — *Controlul, automatizarea şi bazele proiectării instalaţiilor de uscare.*

În elaborarea cărţii, autorii au realizat în general, simplitatea şi accesibilitatea în expunerea materialului, prezentîndu-l în ansamblu într-o formă ştiinţifică corespunzătoare.

Din motive inerente începutului, această lucrare — fiind prima încercare de alcătuire a unui manual pentru facultăţile de specialitate ale institutelor de energetică — prezintă şi o serie de lipsuri.

Astfel nu se lămureşte clar construcţia diagramei $J$, $d$ pentru temperaturi înalte utilizată la calculul uscătoarelor cu şi fără recircularea gazelor de ardere, cît şi la răcirea cu aer şi gaze recirculate a preîncălzitoarelor de aer pentru uscătorii.

Trasarea izotermelor în această diagramă are la bază relaţia (2—10).

$$J = c_{gus}\, t + \frac{d}{1000}\, i_v \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg gaz uscat}}\right).$$

Se arată (p. 71) că pentru calculul uscătoarelor care funcţionează cu amestec de gaze de ardere şi aer, ce are o compoziţie corespunzătoare unui coeficient de exces de aer mare, se poate asimila cu suficientă precizie căldura specifică a gazelor de ardere cu căldura specifică a aerului.

Nu se precizează însă, dacă s-a considerat compoziţia reală a gazelor de ardere la valorile mici ale coeficientului de exces de aer, adică dacă s-a calculat precis valoarea căldurii specifice a gazelor uscate $c_{gus}$.

Aşa după cum se ştie în cazul recirculaţiei gazelor de ardere la preîncălzitoarele de aer la care nu se aspiră aer fals, gazele de ardere au la intrarea în preîncălzitor aceeaşi compoziţie ca gazele recirculate. De aici rezultă că în procesul de amestecare ce are loc între gazele evacuate din focar şi gazele recirculate, compoziţia lor nu se schimbă. Referindu-ne la figura 14—12, recirculaţia gazelor de ardere este prezentată ca un proces ce se produce la conţinut de umiditate constant, deci toate punctele dreptei verticale $M_1N_5$ corespund la aceeaşi compoziţie a gazelor. De aici tragem concluzia că în trasarea izotermelor s-a considerat o compoziţie constantă pentru gazele de ardere, care probabil că pentru simplitate s-au asimilat cu aerul. Această asimilare nu este justificată totdeauna, deoarece temperaturile corespunzătoare punctelor $M_1$ şi $R_4$ se pot realiza şi cu gaze de ardere provenite din combustiunea unui combustibil la un coeficient de exces de aer mic.

Pentru asemenea situaţii, dacă umiditatea gazelor de ardere este provenită numai din arderea combustibilului, calculul cu ajutorul diagramei $i$, $t$ este mult mai precis.

Referitor la cantitatea de gaze recirculate, necesară răcirii a 1 kg de ardere evacuate din focar, avem de făcut observaţia că aceasta nu este dată de raportul $\frac{M_1R_4}{M_1N_5}$ ci de raportul $\rho = \frac{M_1R_4}{R_4N_5}$ (p. 273).

Acestei afirmaţii i se poate da justificarea ce se va expune în continuare, care de altfel, dacă ar fi fost cuprinsă în textul lucrării, ar fi fost deosebit de utilă.

Pentru a răci între temperatura de evacuare din focar $T_{M_1}$ (după răcirea cu aer) şi temperatura admisibilă materialului din care este alcătuit preîncălzitorul $t_{R_4}$, $\left(1+\frac{d}{1000}\right)$ kg gaze de ardere umede vor trebui să absoarbă cantitatea de căldură $J_{M_1} - J_{R_4}$, reprezentată în figura 14—12 prin segmentul $M_1R_4$.

Încălzirea tot a $\left(1+\frac{d}{1000}\right)$ kg gaze umede recirculate între temperatura de evacuare din preîncălzitor $t_{N_5}$ şi temperatura $t_{R_4}$, necesită cantitatea de căldură $J_{R_4} - J_{N_5}$, care este reprezentată tot în figura 14—12 prin segmentul $R_4N_5$. Deoarece cantitatea de căldură ce trebuie absorbită este $J_{M_1} - J_{R_4}$ rezultă că va trebui să se recircule $\rho\left(1+\frac{d}{1000}\right)$ kg gaze de ardere umede, de unde

$$\rho = \frac{J_{M_1} - J_{R_4}}{J_{R_4} - J_{R_5}} = \frac{M_1R_4}{R_4N_5}.$$

Cred că ar fi fost folositor ca în cursul lucrării să se fi dat la scară mare o diagramă $J$, $d$ pentru temperaturi înalte, diagrama $E$, $d$ (fig. 5—3) şi nomogramele psihometrice (fig. 15—12 şi 15—13).

Traducerea cărţii în limba romînă nu s-a efectuat totdeauna în modul cel mai indicat. Astfel utilizarea de expresii în genul: „o cantitate mică de pierdere în mediul înconjurător" (p. 34), sau „poziţia grafică, obţinută, a punctului $M_1$" (p. 84) sînt necorespunzătoare. Pe alocuri lipsesc notaţii în text sau termeni în formule. De asemenea, o serie de figuri apar neclare.

*Victor Ghia*

PASCAL POPESCU, VICTOR PIMSNER şi A. C. VASILESCU, *Contribuţie la studiul şi fabricaţia combustibililor pentru turbomotoare de avion.* Bucureşti, 1955, 39 pag.

Lucrarea *Contribuţie la studiul şi fabricaţia combustibililor pentru turbomotoare de avion* este prima de acest gen în literatura noastră de specialitate, avînd scopul de a umple un gol resimţit în prezent. Autorii, pornind de la constatarea verificată experimental, că un combustibil destinat turbomotoarelor de avion, fabricat după indicaţiile internaţional admise, poate da rezultate nesatisfăcătoare în exploatare, datorită particularităţilor specifice prezentate de substanţe de bază — ţiţeiul — trec în revistă condiţiile pe care trebuie să le îndeplinească un astfel de combustibil, pentru ca pe baza lor să se poată indica soluţia de fabricaţie.

Se constată că un combustibil de turbomotoare de avion trebuie să satisfacă cerinţe foarte severe, contradictorii între ele, şi care trebuie luate în considerare la stabilirea soluţiei de fabricaţie, preponderenţa lor fiind dictată de misiunea avionului. Meritul lucrării constă în analiza critică a tuturor aspectelor, specificîndu-se importanţa fiecărui factor fizic sau chimic asupra procesului de ardere din motor ca şi în interpretarea judicioasă a lucrărilor experimentale.

În afara părţii documentare, studiul cuprinde contribuţii personale de real interes, constituind punctul de plecare pentru noi studii şi cercetări ce se cer a fi întreprinse în acest domeniu.

Partea teoretică şi de cercetări este ilustrată de numeroase diagrame şi tabele, ce conţin datele necesare pentru urmărirea calităţii ţiţeiului, caracteristicile combustibilului special şi felul cum aceste caracteristici influenţează condiţiile de exploatare.

Contribuţia colectivului redacţional reprezintă o realizare serioasă, iar lucrarea ar trebui să aibă o circulaţie lărgită pentru a putea fi consultată şi de alte instituţii interesate.

*Marcel Biener*

I.D.T., *Metode noi de apreciere şi valorificare a turbelor.* Bucureşti, 1953, 120 pag.

Această lucrare a fost alcătuită cu scopul de a completa cunoştinţele tehnicienilor şi specialiştilor noştri, în domeniul turbelor, folosind experienţa creatoare a Uniunii Sovietice.

Materialul documentar cuprins este în marea sa majoritate extras din cărţile şi revistele sovietice de specialitate, indicate la sfîrşitul lucrării.

Împărţită în patru capitole, fiecare din acestea cuprinde o serie de subpuncte, care tratează aproape toate problemele, necesare pentru o completă clarificare şi cunoaştere a turbelor.

Capitolul I, intitulat *Generalităţi despre t urbe,* cuprinde noţiuni despre formarea turbăriilor, proprietăţi generale şi clasificarea genetică a turbelor, proprietăţile lor fizico-chimice, prospectarea turbăriilor şi metodele de analiză a turbei şi a derivaţilor ei.

Capitolul II tratează *Exploatarea şi uscarea turbei.* Sînt descrise metodele şi aparatura de extracţie a turbei sub formă de bucăţi şi a turbei frezate ; de asemenea, uscarea, depozitarea şi transportul acestui combustibil.

Capitolul III vorbind despre *Utilizările generale ale turbei* tratează cîteva dintre cele mai interesante probleme, ca de exemplu : folosirea turbei drept combustibil în focare, cu adaptare specială a grătarelor (pentru : locomotive, încălzit domestic, arderea cărămizilor, furnale etc.). Se redă de asemenea, noua teorie sovietică a brichetării, fabricarea brichetelor, cocsificarea, semicocsificarea şi gazeificarea turbelor şi în sfîrşit problema turbei şi a mlaştinilor în economia rurală şi igiena socială.

Ultimul capitol se ocupă de *Utilizările speciale ale turbei* ca : folosirea acesteia la obţinerea de plăci izolatoare, fibre textile, hîrtie şi carton, mase plastice, ceruri, precum şi utilizarea turbei în medicină, epurarea apelor reziduale, catalizator etc.

Încercările efectuate asupra turbelor şi redate în acest studiu sînt însoţite de diagrame şi tabele exemplificatoare, ca urmare a lucrărilor experimentate şi aplicate apoi cu succes în Uniunea Sovietică.

*C. Ionescu Gheorghiţă*

I 2701

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

# STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

4

ANUL VI

OCTOMBRIE — DECEMBRIE 1956

EDITURA ACADEMIEI REPUBLICII POPULARE ROMÎNE

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

# STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

4

ANUL VI

OCTOMBRIE — DECEMBRIE 1956

EDITURA ACADEMIEI REPUBLICII POPULARE ROMÎNE

*COMITETUL DE REDACȚIE*

ACADEMICIAN I. S. GHEORGHIU — *redactor responsabil*; ACADEMICIAN C. BUDEANU; M. BERCOVICI, membru corespondent al Academiei R. P. R.; M. MARINESCU, membru corespondent al Academiei R. P. R.; C. DINCULESCU, membru corespondent al Academiei R. P. R.; A. AVRAMESCU, membru corespondent al Academiei R.P.R.; I. RĂDULEȚ, membru corespondent al Academiei R.P.R.; C. APETREI; G. BĂRĂNESCU.

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

# STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

Tomul VI, nr. 4 Octombrie-decembrie 1956

## SUMAR

Pag.

*TERMOENERGETICĂ ŞI TERMOTEHNICĂ*

C. I. STAICU, Analiza dimensională. Asupra convecţiei staţionare în circulaţia forţată turbulentă a aerului . . . . . 391

N. PĂNOIU, Asupra consumului de combustibil la cuptoarele clinker de fabricate de uzinele „23 August" la funcţionarea cu gaz metan . . . . . 403

*COMBUSTIBILI SOLIZI*

I. L. BLUM, Elemente caracteristice în procesul de cocsificare a cărbunelui. Nota I. Asupra bitumenului din cărbunii cocsificabili . . . . . 425

*MOTOARE CU COMBUSTIE INTERNĂ*

E. GAIGINSCHI, Domeniul de reversibilitate al maşinilor termice. Aplicaţiile acestei noţiuni la studiul motoarelor cu ardere internă . . . . . 441

*ELECTROENERGETICĂ ŞI ELECTROTEHNICĂ*

AL. FRANSUA. Cîteva precizări în legătură cu aplicarea de către G. Kron a calculului matricial în studiul reţelelor electrice complexe . . . . . 461

C. I. MOCANU, O teoremă în studiul reţelelor electrice prin calcul matricial. . 473

P. DIMO, Aplicarea metodei consumatorului unic în cercetarea stabilităţii dinamice a sistemelor energetice (cu ajutorul graficelor de scurtcircuit). . . . 505

DOREL DAMSKER, Automatizări cu maşini electrice cuprinzînd reacţii pozitive calculate prin metoda frecvenţelor . . . . . 537

*NOTE* . . . . . 559

*RECENZII* . . . . . 569

*DIN ACTIVITATEA INSTITUTULUI DE ENERGETICĂ AL ACADEMIEI R.P.R.* . . . . . 571

EDITURA ACADEMIEI REPUBLICII POPULARE ROMÎNE

ACADÉMIE DE LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE ROUMAINE
INSTITUT D'ÉNERGÉTIQUE

# ÉTUDES ET RECHERCHES D'ÉNERGÉTIQUE

Tome VI, n° 4 Octobre-décembre 1956

## SOMMAIRE

Page

*THERMOÉNERGÉTIQUE ET THERMOTECHNIQUE*

C. I. STAICU, Analyse dimensionnelle. Sur la convection stationnaire dans la circulation forcée turbulente de l'air . . . . . 391

N. PĂNOIU, Sur la consommation de combustible, lors du fonctionnement au gaz méthane, des fours à clinker fabriqués dans les usines „23 Août". . . 403

*COMBUSTIBLES SOLIDES*

I. L. BLUM, Eléments caractéristiques dans le processus de cokéfaction de la houille. Note I. Du bitume contenu dans les houilles cokéfiables. . . . . 425

*MOTEURS À COMBUSTION INTERNE*

E. GAIGINSCHI, Le domaine de réversibilité des machines thermiques. Les applications de cette notion à l'étude des moteurs à combustion interne . . . . 441

*ÉLECTROÉNERGÉTIQUE ET ÉLECTROTECHNIQUE*

AL. FRANSUA, Quelques précisions sur l'application par G. Kron du calcul matriciel à l'étude des réseaux électriques complexes . . . . . 461

C. I. MOCANU, Un théorème dans l'étude des réseaux électriques à l'aide du calcul matriciel . . . . . 473

P. DIMO, Application de la méthode du consommateur unique à l'étude de la stabilité dynamique des systèmes énergétiques (à l'aide des graphiques de court-circuit) . . . . . 505

DOREL DAMSKER, Automatisations par des machines électriques à réactions positives, calculées par la méthode des fréquences . . . . . 537

*NOTES* . . . . . 559

*COMPTES RENDUS* . . . . . 569

*L'ACTIVITÉ DE L'INSTITUT D'ÉNERGÉTIQUE DE L'ACADÉMIE DE LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE ROUMAINE* . . . . . 571

ÉDITIONS DE L'ACADÉMIE DE LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE ROUMAINE

АКАДЕМИЯ РУМЫНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ

# ТРУДЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ЭНЕРГЕТИКЕ

Том VI, № 4 Октябрь-декабрь 1956

## СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

*ТЕРМОЭНЕРГЕТИКА И ТЕРМОТЕХНИКА*

К. И. СТАЙКУ, Размерный анализ. О стационарной конвекции в принудительной турбулентной циркуляции воздуха . . . . . 391

Н. ПЭНОЮ, О расходе горючего в работающих на болотном газе клинкерных печах, построенных заводом „23 Августа“ . . . . . 403

*ТВЕРДОЕ ТОПЛИВО*

И. Л. БЛУМ, Характерные элементы процесса коксования угля. Сообщение I. О битуме, получаемом из коксующегося угля . . . . . 425

*ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ*

Э. ГАИЧИНСКИ, Область обратимости тепловых двигателей. Применение этого понятия для изучения двигателей внутреннего сгорания . . . 441

*ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА*

А. ФРАНСУА, Несколько уточнений в связи с применением Г. Кроном матричного расчета для исследования комплексных электрических сетей 461

К. И. МОКАНУ, Теорема, вытекающая из исследования электрических сетей при помощи матричного исчисления . . . . . 473

П. ДИМО, Применение метода единого потребления к исследованию динамической устойчивости энергетических систем (при помощи графиков короткого замыкания) . . . . . 505

Д. ДАМСКЕР, Автоматизации электрическими машинами при наличии положительных реакций, вычисленные по методу частот . . . . . 537

*ЗАМЕТКИ* . . . . . 559

*РЕЦЕНЗИИ* . . . . . 569

*В ИНСТИТУТЕ ЭНЕРГЕТИКИ АКАДЕМИИ РУМЫНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ* . . . . . 571

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ РУМЫНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 4, 1956

*TERMOENERGETICĂ ŞI TERMOTEHNICĂ*

# ANALIZA DIMENSIONALĂ ASUPRA CONVECŢIEI STAŢIONARE ÎN CIRCULAŢIA FORŢATĂ TURBULENTĂ A AERULUI *)

DE

C. I. STAICU

**1.** Modul de obţinere, prin analiza dimensională modernă, a relaţiilor existente între mărimile utilizate la descrierea unui fenomen, a fost expus în două lucrări anterioare [1] şi [2]. În baza celor arătate, vom aplica metoda dimensională, în cele ce urmează, la stabilirea relaţiei analitice a coeficientului cedării căldurii pentru convecţia staţionară în circulaţia forţată turbulentă a aerului, relaţie care să respecte rezultatele experimentale.

**2.** Pentru coeficientul cedării căldurii $\alpha$, în cazul considerat de noi, a fost stabilită, după [3], o relaţie analitică, de către Kármán-Latzko, conform căreia

$$\alpha = 128{,}16\, c_p\, w^{0.8}\, l^{-0.2}\, \nu^{0.2}, \qquad (1)$$

în care $c_p$ este căldura specifică a aerului, $w$ viteza de scurgere, $l$ dimensiunea liniară caracteristică, iar $\nu$ este viscozitatea cinematică.

**3.** Acelaşi coeficient este dat, după [3], de formula empirică stabilită de Stanton, conform căreia

$$\alpha = 3{,}01\ (1 + 0{,}0075\ T)\ w^{0.73}, \qquad (2)$$

în care $T$ este temperatura absolută, iar $w$ are semnificaţia cunoscută. După cum se poate constata uşor, relaţia (2) nu este omogenă.

**4.** Coeficientul cedării căldurii este apoi calculat din rezultatele obţinute la măsurătorile experimentale făcute de H. Doetsch, Cercetările experimentale de pînă acum nu depăşesc, după [3], vitezele de 70—100 m/s pentru vîna de aer. Graficul rezultatelor obţinute de Doetsch reprezintă, în ordonate, coeficientul cedării căldurii $\alpha$, iar în abscise

*) Lucrare prezentată Institutului de energetică la data de 15 ianuarie 1956.

sînt trecute vitezele vînei de aer $w$ (fig. 1). Din acest grafic scoatem valorile celor două mărimi, în diferite situații, pe care le dăm în tabloul nr. 1.

*Tabloul nr. 1*

| $w$, m/s | 10 | 13 | 16 | 19 | 24 | 29 | 34 | 43 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\alpha$, kcal/m²h°C | 36 | 44 | 52 | 60 | 72 | 83 | 95 | 110 |
| $\alpha$, kcal/m²s°C | 0,0100 | 0,0122 | 0,0144 | 0,0166 | 0,0200 | 0,0230 | 0,0264 | 0,0305 |

Cele două grupe de valori pentru coeficientul $\alpha$, date în tabloul nr. 1 sînt diferite din cauza unităților de măsură întrebuințate; diferențele provin din măsurarea timpului cu ora, respectiv cu secunda. În cele ce urmează vom utiliza valorile coeficientului $\alpha$, corespunzătoare ambelor sisteme de unități.

Măsurătorile făcute de D o e t s c h sînt concretizate, după [3], prin următoarele condiții de experimentare:

— corpul de lucru, aerul;
— temperatura aerului, $t = 40°C$; (3)
— dimensiunea liniară caracteristică, $l = 0{,}5$ m;
— viscozitatea cinetică a aerului, $\nu = 17{,}5 \times 10^{-6} m^2/s$;
— căldura specifică a aerului, $c_p = 0{,}26$ kcal/°Cm³.

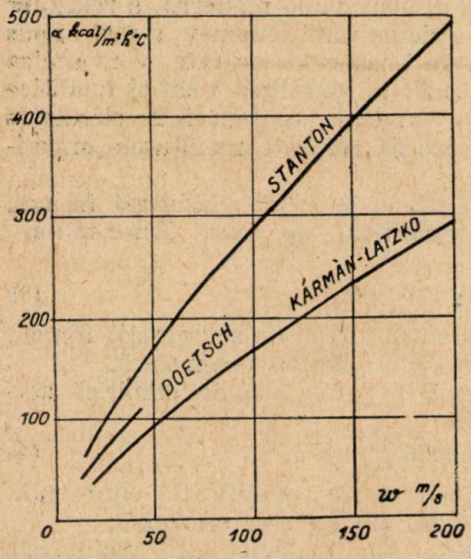



Fig. 1. — Curbele formulelor Stanton și Kármán-Latzko. Curba experiențelor Doetsch.

5. Pentru a ne da seama de ordinul de mărime al coeficientului cedării căldurii dat de formule și experiență, în situația considerată, întocmim graficul $\alpha = f(w)$ din figura 1.

Constatăm că valorile coeficientului cedării căldurii obținute experimental sînt aproximativ la mijloc între valorile date de formula Stanton, care sînt mai mari și valorile date de formula Kármán-Latzko, care sînt mai mici. Rezultă deci că expresiile analitice date nu corespund rezultatelor experimentale.

6. Pentru a pune de acord rezultatele măsurătorilor experimentale cu o formulă analitică, vom determina coeficientul cedării căldurii prin analiza dimensională modernă.

Considerăm fenomenul descris cu mărimile care apar în formula Kármán-Latzko; aceste mărimi compun funcția implicită

$$f(\alpha, c_p, w, l, \nu) = 0 \qquad (4)$$

de la care pornim pentru a stabili relația căutată.

Utilizarea analizei dimensionale la stabilirea unei relații ne impune să adoptăm un sistem de unități în baza căruia să exprimăm ecuațiile dimensionale ale mărimilor utilizate la descrierea fenomenului studiat. Astfel, în baza sistemului de unități : lungime, timp, cantitate de căldură și temperatură (L, T, Q, θ), unitățile de măsură și ecuațiile dimensionale ale mărimilor prezente sînt următoarele :

$$\begin{aligned} &\alpha \text{ kcal/m}^2\text{h°C} = \mathrm{L^{-2}\,T^{-1}\,Q\theta^{-1}} \\ &c_p \text{ kcal/°Cm}^3 = \mathrm{L^{-3}\,Q\theta^{-1}} \\ &w \text{ m/s} = \mathrm{L\,T^{-1}} \\ &l \text{ m} = \mathrm{L} \\ &\nu \text{ m}^2\text{/s} = \mathrm{L^2T^{-1}} \end{aligned} \tag{5}$$

Noua formulă, pe care o vom stabili mai jos din funcția (4), ecuațiile (5) și prin aplicarea principiului omogenității, diferă de cea dată de K á r m á n - L a t z k o ; aceasta din urmă nu conduce la rezultatele obținute experimental, iar noi ne-am propus să satisfacem tocmai această concordanță între o formulă analitică și rezultatele obținute la măsurătorile făcute de D o e t s c h . Pe de altă parte, am convenit deja mai sus ca în formula căutată să apară aceleași mărimi ca în formula K á r m á n - L a t z k o ; rezultă deci că, pentru a obține alte rezultate, în noua formulă trebuie să apară alte valori pentru factorul numeric și exponenții care însoțesc mărimile prezente. În această situație scriem funcția (4) sub forma

$$k\alpha^a c_p^b w^c l^d \nu^e = 1 \tag{6}$$

în care $k$, $a$, $b$,... sînt necunoscutele problemei.

În relația (6) nu am explicitat mărimea care interesează sau oricare alta din mărimile prezente. Justificarea faptului că am atribuit exponenți necunoscuți tuturor mărimilor prezente, am dat-o în [1]. Acest procedeu, întrebuințat în analiza dimensională modernă așa cum se arată în [1] și [2], mărește numărul necunoscutelor cu o unitate față de numărul necunoscutelor care apar în analiza dimensională clasică.

Modul de a scrie utilizat de noi este preferat în analiza dimensională modernă, deoarece prezintă avantajul că ecuațiile obținute prin aplicarea principiului omogenității sînt de tip diofantian cu soluții numere întregi.

Dacă procedăm în cazul de față ca în analiza dimensională clasică și explicităm, de la început, mărimea care interesează — ceea ce înseamnă că exponentul mărimii respective ia valoare unitară — funcția (4) ia forma

$$\alpha = k\, c_p^{b/a}\, w^{c/a}\, l^{d/a}\, \nu^{e/a} \tag{7}$$

pe care o deducem din (6). Prin introducerea ecuațiilor (5) în (7) și aplicarea principiului omogenității, obținem un sistem de ecuații care conduce la valori fracționare pentru exponenții necunoscuți. Pe de altă parte, sistemul obținut are mai multe necunoscute decît ecuații ; în această situație nu putem obține valori unice pentru exponenți. Rezultă deci că

relația căutată nu poate fi stabilită prin analiza dimensională clasică; ea poate fi stabilită însă prin analiza dimensională modernă, [1] și [2].

Procedeul utilizat în analiza dimensională modernă, în baza căruia atribuim exponenți necunoscuți tuturor mărimilor prezente, nu este suficient pentru stabilirea relației căutate. Acest procedeu conduce la valori întregi pentru exponenții tuturor mărimilor utilizate la descrierea fenomenului. Valorile pe care le pot lua exponenții sînt cuprinse în intervalul de la $-\infty$ pînă la $+\infty$, ceea ce înseamnă că nu putem preciza valorile unice căutate. Ei admit deocamdată o infinitate de soluții matematice posibile.

Pentru reducerea numărului soluțiilor întregi, valabile sistemelor diofantiene stabilite prin aplicarea principiului omogenității, utilizăm precizările din [1], conform cărora exponenții, care apar în relațiile ce transcriu legile după care se produc fenomenele fizice din natură, sînt mici, iar în stadiul actual de dezvoltare a cunoștințelor noastre, valorile lor nu depășesc primele 4—5 numere ale sistemului zecimal. Această precizare reduce numărul soluțiilor matematic posibile la un număr discret de soluții dimensional valabile și fizic posibile, printre care se găsesc și soluțiile care conduc la relația fizic valabilă.

Cu aceste precizări, care justifică cele ce vor urma, introducem în (6) ecuațiile (5)

$$(L^{-2}T^{-1}Q\theta^{-1})^a\,(L^{-3}Q\theta^{-1})^b\,(LT^{-1})^c\,(L)^d\,(L^2T^{-1})^e = 1, \tag{8}$$

sau, după ce grupăm dimensiunile, putem scrie

$$L^{-2a-3b+c+d+2e}\,T^{-a-c-e}\,Q^{a+b}\,\theta^{-a-b} = 1. \tag{9}$$

În conformitate cu principiul omogenității, pe care îl respectă orice relație analitică, dimensiunile prezente trebuie să fie aceleași de ambele părți ale semnului de egalitate; această condiție se exprimă prin ecuațiile

$$\begin{aligned} -2a - 3b + c + d + 2e &= 0 \\ -a - c - e &= 0 \\ a + b &= 0. \end{aligned} \tag{10}$$

Sistemul obținut este format din trei ecuații omogene cu cinci necunoscute. Numărul ecuațiilor este cu o unitate mai mic decît numărul dimensiunilor sistemului adoptat, deoarece dimensiunile Q și $\theta$ conduc la aceeași ecuație; numărul necunoscutelor este egal cu numărul mărimilor. Sistemul (10) este de tip diofantian cu soluții numere întregi și admite o infinitate de soluții.

Pentru rezolvarea sistemului (10) căutăm o soluție particulară, care va fi

$$\begin{aligned} a &= 1 & c &= 1 & e &= -2. \\ b &= -1 & d &= 2 \end{aligned} \tag{11}$$

Cu aceste soluții formăm ecuația

$$\alpha - \beta + \gamma + 2\,\delta - 2\,\varepsilon = 1, \tag{12}$$

în care $\alpha, \beta, \gamma, \ldots$ sînt întregi. O soluție a acestei ecuații este următoarea

$$\begin{aligned} \alpha &= 1, \\ \beta = \gamma = \delta = \varepsilon &= 0. \end{aligned} \tag{13}$$

Cunoscînd întregii $\alpha, \beta, \ldots$ formăm ecuația

$$a = x \tag{14}$$

cu care completăm sistemul (10).

Prin acest procedeu am obținut un nou sistem format din patru ecuații; cum numărul necunoscutelor a rămas neschimbat, este necesar să repetăm operațiile de mai sus pentru sistemul omogen cu patru ecuații format din sistemul (10), la care adăugăm ecuația $a = 0$.

O soluție particulară a noului sistem este

$$\begin{array}{lll} a = 0 & c = 1 & e = -1 \\ b = 0 & d = 1 & \end{array} \tag{15}$$

cu care formăm ecuația

$$0\,\alpha + 0\,\beta + \gamma + \delta - \varepsilon = 1. \tag{16}$$

O soluție a ecuației (16) este următoarea

$$\begin{aligned} \alpha = \beta = \delta = \varepsilon &= 0 \\ \gamma &= 1, \end{aligned} \tag{17}$$

de unde rezultă, ca și mai sus, o nouă ecuație

$$c = y \tag{18}$$

cu care completăm sistemul (10) inițial.

În acest mod am obținut un sistem de cinci ecuații (10), (14) și (18) cu cinci necunoscute; fiind respectată condiția cerută de algebră, noul sistem poate fi rezolvat în funcție de parametrii introduși suplimentar.

Procedeul utilizat ne poate conduce la nouă sisteme diferite; numărul lor este dat de combinările fără repetiție a cinci elemente (numărul necunoscutelor) luate cîte două elemente (numărul ecuațiilor suplimentare) mai puțin o combinație datorită ecuației din urmă a sistemului (10).

Noul sistem de cinci ecuații omogene

$$\begin{array}{ll} 2a + 3b - c - d - 2e = 0 & a = x \\ a + c + e = 0 & c = y \\ a + b = 0 & \end{array} \tag{19}$$

admite următoarele soluții, date în funcție de parametrii introduși suplimentar

$$\begin{array}{lll} a = x & c = y & e = -x - y. \\ b = -x & d = x + y & \end{array} \tag{20}$$

Atribuim celor doi parametri arbitrari $x$ și $y$ perechi de valori dintre primele 4—5 numere de la începutul șirului natural; cu aceste valori și

cele corespunzătoare necunoscutelor, conform ecuațiilor (20), întocmim, pentru ușurință, tablouri de natura celui de mai jos.

Studiul acestui fenomen, bazat pe rezolvarea unui sistem diofantian cu soluții numere întregi, ne dă posibilitatea să găsim în mod

*Tabloul*

| $x$ | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y$ | | −3 | −2 | −1 | 1 | 2 | −4 | −3 | −2 | −1 | 1 | −5 |
| $a$ | $x$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| $b$ | $-x$ | −1 | −1 | −1 | −1 | −1 | −2 | −2 | −2 | −2 | −2 | −3 |
| $c$ | $y$ | −3 | −2 | −1 | 1 | 2 | −4 | −3 | −2 | −1 | 1 | −5 |
| $d$ | $x+y$ | −2 | −1 | 0 | 2 | 3 | −2 | −1 | 0 | 1 | 3 | −2 |
| $e$ | $-x-y$ | 2 | 1 | 0 | −2 | −3 | 2 | 1 | 0 | −1 | −3 | 2 |

sistematic, nu prin tatonări, relațiile dimensional valabile fenomenului descris cu mărimile considerate.

Prin rezolvarea sistemului diofantian din cazul de față, am obținut soluțiile din tabloul nr. 2, în care am introdus numai coloanele care interesează pentru stabilirea rezultatului căutat; dintre acestea, se elimină coloanele care conțin valori nule, deoarece relațiile respective nu ar conține toate mărimile utilizate la descrierea fenomenului Pentru stabilirea relației căutate este necesar să găsim coloana care să ne conducă la o relație conformă cu rezultatele obținute la măsurători.

Din aplicarea acestei metode la stabilirea relațiilor pentru un număr mare de fenomene fizice, care ne-a condus la rezultate identice celor stabilite prin alte metode de calcul, am ajuns la concluzia că pentru fiecare valoare distinctă atribuită parametrului $x$ există două coloane ale căror soluții, în trecerea de la o coloană la alta, schimbă semnul și valoarea unor necunoscute, altele schimbă numai semnul, în timp ce cîteva necunoscute rămîn neschimbate. Cele două coloane sînt alăturate, în cazul de față, de ambele părți, unei a treia coloane cu valori nule pentru cîteva necunoscute.

Această observație ne conduce la reducerea numărului coloanelor cu soluții dimensional valabile, iar reducerea se face în favoarea soluției fizic valabile, care urmează să fie precizată dintr-un număr mai mic de soluții dimensional valabile.

Dintre coloanele care în cazul de față satisfac observația de mai sus, reținem, pentru fiecare valoare distinctă a parametrului $x$, coloanele cu soluțiile cele mai mici, în ansamblul lor, pentru necunoscutele problemei, deoarece se arată în [1] că aceste soluții corespund realității fizice a fenomenului. În urma trierii, extragem soluțiile din tabloul nr. 3.

Din cercetarea tabloului nr. 3 rezultă că cei doi parametri respectă legi de formare concrete, conform cărora $x = n + 1$, iar $y = -n$, în care $n$ ia valorile șirului natural de numere.

Menționăm că soluțiile de pe ultima linie a tabloului nr. 3 sînt valo-

*nr. 2*

| | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| −4 | −3 | −2 | −1 | −5 | −4 | −3 | −2 | −1 | −6 | −5 | −4 | −3 | −2 |
| 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| −3 | −3 | −3 | −3 | −4 | −4 | −4 | −4 | −4 | −5 | −5 | −5 | −5 | −5 |
| −4 | −3 | −2 | −1 | −5 | −4 | −3 | −2 | −1 | −6 | −5 | −4 | −3 | −2 |
| −1 | 0 | 1 | 2 | −1 | 0 | 1 | 2 | 3 | −1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 1 | 0 | −1 | −2 | 1 | 0 | −1 | −2 | −3 | 1 | 0 | −1 | −2 | −3 |

rile întregi ale exponenților din formula Kármán-Latzko (1) ridicată la puterea a cincea, pe care am restabilit-o deci prin analiza dimensională.

*Tabloul nr. 3*

| $x$ | $y$ | $a$ | $b$ | $c$ | $d$ | $e$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 | −1 | 2 | −2 | −1 | 1 | −1 |
| 3 | −2 | 3 | −3 | −2 | 1 | −1 |
| 4 | −3 | 4 | −4 | −3 | 1 | −1 |
| 5 | −4 | 5 | −5 | −4 | 1 | −1 |

Așa cum am arătat deja mai sus, formula (1) nu corespunde rezultatelor obținute la măsurători.

În baza celor arătate mai sus am reușit să reducem numărul grupelor de soluții care ne conduc la relații dimensional valabile și fizic posibile; reducerea mai departe, în favoarea soluției care să ne conducă la relația fizic valabilă, nu mai poate fi făcută prin analiza dimensională. Sînt necesare și alte considerente pentru precizarea relației căutate.

Soluțiile corespunzătoare exponenților din relația căutată se găsesc, în orice caz, pe una dintre cele trei linii rămase valabile din tabloul nr. 3 după eliminarea ultimei linii. Aceste valori introduse în (6) ne dau următoarele relații dimensional valabile și fizic posibile:

$$\alpha = k_1 c_p \sqrt[2]{\frac{w\nu}{l}} = k_2 c_p \sqrt[3]{\frac{w^2\nu}{l}} = k_3 c_p \sqrt[4]{\frac{w^3\nu}{l}}. \qquad (21)$$

Dintre relațiile (21) numai una singură este valabilă pentru coeficientul de cedare a căldurii în cazul considerat de noi. Pentru precizarea

ei apelăm la rezultatele experimentale obținute la măsurătorile făcute de D o e t s c h; ele dau posibilitatea să precizăm relația fizic valabilă din cele trei relații (21) fizic posibile. În acest mod introducem experiența ca parte intrinsecă a metodei dimensionale.

Datele obținute la măsurătorile făcute de D o e t s c h au fost prezentate mai sus, în tabloul nr 1; de asemenea au fost menționate la loc potrivit și condițiile de experimentare astfel că dispunem de o serie de valori pentru mărimile dimensionale care apar în relațiile (21). Factorii numerici $k_n$ sînt necunoscuți.

Introducem valorile mărimilor $c_p$, $l$, $\nu$ de la condițiile de experimentare (3) și valorile mărimilor $w$ și $\alpha$ din tabloul nr. 1, în fiecare din relațiile (21). În urma efectuării calculelor algebrice indicate de exponenții afectați mărimilor din relațiile respective, obținem diverse valori pentru actorii constanți $k_n$. Astfel, ultima relație (21) ne conduce la rezultatele din tabloul nr. 4. La întocmirea acestui tablou ținem seamă de faptul că timpul este măsurat cu ora în coeficientul cedării căldurii, iar în viteză și viscozitatea cinematică este măsurat cu secunda; pentru ca rezultatele să fie valabile, luăm din tabloul nr. 1 valorile $\alpha$ corespunzătoare.

*Tabloul nr. 4*

| $w$ | $\nu$ | $l$ | $c_p$ | $k c_p \sqrt[4]{\frac{w\nu}{l}}$ | $\alpha$ | $k$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | $17{,}5 \times 10^{-6}$ | 0,5 | 0,26 | 0,1134 | 0,0100 | 0,0882 |
| 13 | $17{,}5 \times 10^{-6}$ | 0,5 | 0,26 | 0,1384 | 0,0122 | 0,0883 |
| 16 | $17{,}5 \times 10^{-6}$ | 0,5 | 0,26 | 0,1619 | 0,0144 | 0,0892 |
| 19 | $17{,}5 \times 10^{-6}$ | 0,5 | 0,26 | 0,1829 | 0,0166 | 0,0910 |
| 24 | $17{,}5 \times 10^{-6}$ | 0,5 | 0,26 | 0,2198 | 0,0200 | 0,0910 |
| 29 | $17{,}5 \times 10^{-6}$ | 0,5 | 0,26 | 0,2536 | 0,0230 | 0,0910 |
| 34 | $17{,}5 \times 10^{-6}$ | 0,5 | 0,26 | 0,2840 | 0,0264 | 0,0927 |
| 43 | $17{,}5 \times 10^{-6}$ | 0,5 | 0,26 | 0,3387 | 0,0305 | 0,0903 |

Din cercetarea tabloului rezultă că valorile factorului numeric variază în limite foarte restrînse; acceptăm o valoare medie $k = 9{,}08 \times 10^{-2}$.

Dacă întocmim tablouri asemănătoare și pentru primele două relații (21), obținem alte valori pentru factorii numerici corespunzători; în cazul acestor relații, factorii numerici variază între limite largi și nu putem accepta o valoare medie.

Introducem valoarea medie $k$ acceptată mai sus în relația respectivă (21), care ne dă

$$\alpha = 9{,}08 \times 10^{-2} c_p \sqrt[4]{\frac{w\nu}{l}} \text{ kcal/m}^2 \text{ s°C}. \qquad (22)$$

Faptul că valoarea factorului numeric variază în limite foarte restrînse numai pentru una din relațiile dimensional valabile, variație care ne permite să admitem o valoare medie, ne dovedește că relația respectivă

corespunde realității fizice a fenomenului; acest lucru l-am arătat în [1]. În această situație se găsește relația (22), care reprezintă deci expresia analitică a coeficientului cedării căldurii în conformitate cu experiențele făcute de D o e t s c h.

Relația (22), scrisă pentru coeficientul $\alpha$, măsurat în unități obișnuite, devine

$$\alpha = 327\, c_p \sqrt[4]{\frac{\overline{w^3}\nu}{l}} \text{ kcal/m}^2 \text{ h °C} \qquad (23)$$

**7.** Rezultatele pe care le obținem cu formula (23), stabilită prin analiza dimensională, sînt foarte apropiate de cele obținute la măsurătorile făcute de D o e t s c h. Pentru a ne da seama de această apropiere, întocmim tabloul nr. 5.

*Tabloul nr. 5*

| $w$ | 10 | 13 | 16 | 19 | 24 | 29 | 34 | 43 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\alpha$ măsurat | 36 | 44 | 52 | 60 | 72 | 83 | 95 | 110 |
| $\alpha$ calculat | 37,1 | 45,2 | 52,9 | 59,7 | 71,8 | 82,9 | 92,8 | 111 |
| $\varepsilon$ % | +2,9 | +2,6 | +1,7 | −0,5 | −0,3 | −0,1 | −2,3 | +0,9 |

În acest tablou am dat și diferențele, considerate ca erori, dintre cele două rezultate: experimental și analitic. Valorile calculate cu noua formulă sînt mai mari decît cele obținute experimental, în zona vitezelor joase; în zona vitezelor ridicate, valorile calculate sînt mai mici decît cele măsurate. Diferențele între cele două rezultate sînt de cca $\pm 2\%$.

Reprezentarea grafică a valorilor calculate cu relația stabilită de noi (23) este dată punctat în figura 2, în care am prezentat la scara mărită zona experimentată, pentru evidența concluziilor.

Din figura 2 rezultă că noua formulă este în concordanță cu rezultatele măsurătorilor obținute la experiențele făcute de D o e t s c h. Diferențele provin din faptul că am acceptat o valoare medie pentru factorul numeric din relația (22).

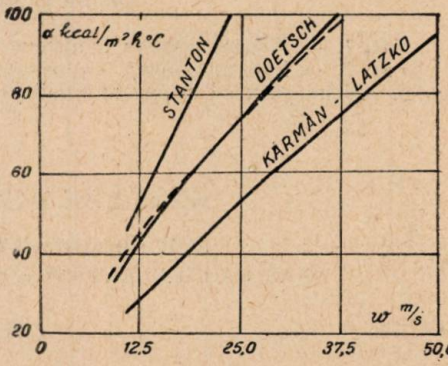



Fig. 2. — Curbele formulelor Stanton și Kármán-Latzko. Curba experiențelor Doetsch. Curba formulei noi (S t a i c u).

**8.** Relația (23), stabilită în baza celor de mai sus, poate fi transformată algebric, astfel încît să o putem compara cu relația (1) stabilită de K á r m á n-L a t z k o; coeficientul cedării căldurii

$$\alpha = 327\, c_p\, w^{0,75}\, l^{-0,25}\, \nu^{0,25}, \qquad (24)$$

Cele două relații (1) și (24) se deosebesc prin valorile atribuite factorului numeric și exponenților care însoțesc mărimile utilizate la descrierea acestui fenomen. Modificările aduse de noi au rezultat din necesitatea stabilirii unei relații analitice în conformitate cu rezultatele măsurătorilor experimentale. Propunem relația (24) în locul relațiilor existente.

## РАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ

### О СТАЦИОНАРНОЙ КОНВЕКЦИИ В ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОЗДУХА

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Выведенные аналитически Карманом—Лацко, а эмпирически Стантоном, формулы коэффициента отдачи тепла при стационарной его передаче через турбулентную зону принудительно движущегося воздушного потока не согласуются с результатами измерений, произведенных Детшем.

В настоящем исследовании устанавливается новая формула в соответствии с результатами опытных измерений. Для вывода этой формулы автор использовал размериый анализ, внеся со своей стороны некоторые дополнения. Автор предлагает заменить существующие формулы этой новой формулой, более точно выражающей рассматриваемое физическое явление.

### ОБЪЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

**Рис. 1. — Кривые формул Стантона и Карман — Лацко. Кривая опытов Детша.**
**Рис. 2. — Кривая формул Стантона и Карман — Лацко. Кривая опытов Детша. Кривая новополученной формулы (Стайку).**

## ANALYSE DIMENSIONNELLE

### SUR LA CONVECTION STATIONNAIRE DANS LA CIRCULATION FORCÉE TURBULENTE DE L'AIR

(RÉSUMÉ)

Les formules actuelles, établies d'une manière analytique par Kármán-Latzko et d'une manière empirique par Stanton, pour le coefficient de dissipation de la chaleur dans le cas de la transmission stationnaire de la chaleur à travers la zone turbulente d'un courant d'air en mouvement forcé, ne concordent pas avec les résultats obtenus lors des mesures faites par Doetsch.

Dans cette étude, on établit une nouvelle formule, conforme aux résultats des mesures expérimentales. Pour déduire cette formule, l'auteur

s'est servi de l'analyse dimensionnelle, complétée de quelques contributions personnelles. Il propose de remplacer les formules actuelles par cette nouvelle formule, qui rend avec plus de fidélité le phénomène physique.

## EXPLICATION DES FIGURES

Fig. 1. — Courbes des formules de Stanton et Kármán-Latzko. Courbe des expériences de Doetsch.

Fig. 2. — Courbes des formules de Stanton et Kármán-Latzko. Courbe des expériences de Doetsch. Courbe de la nouvelle formule (Staicu).

## BIBLIOGRAFIE

1. I. C. Staicu, *Analiza dimensională. Stabilirea relațiilor monoame și omogene.* Studii și cercetări de fizică, t. V, nr. 3—4, iulie—decembrie 1954, p. 237—248.
2. . . . *Analiza dimensională. Convenția staționară în circulația liberă.* Studii și cercetări de energetică, t. V, nr. 3—4, iulie—decembrie 1955, p. 317—329.
3. D. Jacoyleff, *Eléments de la théorie des moteurs à combustion interne à régime rapide.* Paris - Liège, 1948.
4. M. A. Miheev, *Bazele transmiterii căldurii.* Ed. energetică de stat, București, 1953.

26. c. 2579.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 4, 1956

*TERMOENERGETICĂ ŞI TERMOTEHNICĂ*

# ASUPRA CONSUMULUI DE COMBUSTIBIL LA CUPTOARELE DE CLINKER FABRICATE DE UZINELE „23 AUGUST" LA FUNCŢIONAREA CU GAZ METAN *)

DE

N. PĂNOIU

Începînd din anul 1955 în cadrul Institutului de energetică al Academiei R.P.R. a fost introdusă tema „Îmbunătăţirea randamentului cuptoarelor de clinker fabricate în R.P.R.".

În cadrul acestei teme, care face parte din preocupările institutului pentru reducerea consumului de combustibil în industrie s-au efectuat primele încercări experimentale în lunile aprilie-mai, din anul trecut. Încercările experimentale au fost efectuate pe un cuptor rotativ de clinker, care foloseşte drept combustibil gazul metan.

Caracteristicile constructive ale cuptorului care a fost încercat sînt următoarele :

| | |
|---|---|
| 1) lungimea cuptorului | 88,6 m ; |
| 2) diametrul cuptorului | 3,4/3 m ; |
| 3) diametrul mediu al cuptorului | 3 m ; |
| 4) raportul dintre lungimea şi diametrul cuptorului | 29,5 ; |
| 5) suprafaţa interioară a cuptorului | 835 $m^2$ ; |
| 6) viteza de rotire a cuptorului | 0,9 rot/min ; |
| 7) înclinarea cuptorului | 5 % ; |
| 8) tipul răcitorului | cu tambur ; |
| 9) tipul recuperatorului | cu lanţuri ; |
| 10) felul combustibilului | gaz metan ; |
| 11) puterea calorică a combustibilului | 8535 kcal/$Nm^3$ ; |
| 12) felul materiei prime | calcar şi marnă ; |
| 13) fineţea de măcinare a materiei prime (reziduuri pe sită n 70) | 5,56 % ; |
| 14) productivitatea medie a cuptorului | 10 770 kg/h ; |

*) Lucrare prezentată Institutului de energetică la data de 15 ianuarie 1956.

15) productivitatea specifică a cuptorului . . . . 12,9 kg/m²h;
16) solicitatea termică a cuptorului . . . . . 23,066 $10^6$ kcal/h;
17) consumul specific mediu de combustibil 1990 kcal/kg clinker;
18) felul tirajului . . . . . artificial.

Lucrările experimentale au fost efectuate în timp ce agregatul a fost în plină producție. Încercările au fost efectuate în două etape și anume :

— în prima perioadă de 10 zile a cîte 24 ore/zi au fost efectuate încercări pe cuptor așa cum a fost găsit în producție;

— în a doua perioadă de 6 zile a cîte 24 ore/zi au fost efectuate încercări experimentale, după ce s-au efectuat o serie de modificări propuse de echipa de cercetare. Printre modificările mai importante ce au fost efectuate sînt : adaptarea unui injector cu cameră de preamestec în locul

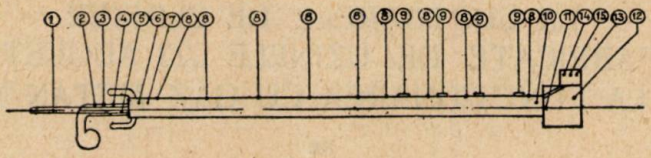


Fig. 1. — Echiparea cuptorului cu aparate de măsură.

*1*, aparat pentru măsurat debitul și presiunea gazului metan; *2*, aparat pentru măsurat debitul de aer primar; *3*, aparat pentru măsurat presiunea aerului primar; *4*, aparat pentru măsurat temperatura aerului primar; *5*, aparat pentru măsurat presiunea gazului metan în corpul injectorului; *6*, aparat pentru măsurat temperatura în spațiul de lucru; *7*, aparat pentru măsurat temperatura clinkerului; *8*, aparat pentru măsurat temperatura mantalei cuptorului; *9*, ștuțuri pentru prelevarea probelor de material; *10*, priză pentru prelevat probe de gaze de ardere; *11*, aparat pentru măsurat temperatura gazelor de ardere; *12*, aparat pentru măsurat tirajul la coș; *13*, aparat pentru măsurat temperatura materiei prime; *14*, oala de 0,31 m³ pentru măsurat debitul de materie primă; *15*, locul de prelevarea probelor de material.

unui injector cu jet central și mărirea lungimii zonei de lanțuri pentru recuperare de la 8 perdele de lanțuri a cîte 1 m la 13 perdele de lanțuri a cîte 1 m.

Măsurarea diverșilor parametri s-a efectuat orar și s-a înregistrat în protocoalele de măsurători.

În figura 1 este prezentată schița cuptorului de clinker și amplasarea aparatelor de măsură cu ajutorul cărora s-au efectuat încercările experimentale.

Scopul studiului a fost de a se determina caracteristicile termotehnice ale acestui cuptor și de a se găsi performanțele de consum de combustibil și de productivitate către care trebuie să se meargă în industria cimentului, echipată cu asemenea cuptoare.

Totodată studiul își propune să scoată în evidență îmbunătățirile ce trebuie aduse agregatului, pentru a se realiza o producție maximă de clinker cu un consum minim de combustibil. În lucrarea de față se vor vedea rezultatele parțiale obținute la încercările experimentale efectuate la un cuptor de clinker fabricat în R.P.R., care funcționează cu gaz metan, urmînd ca într-o lucrare viitoare să fie prezentate rezultatele obținute la încercările unui cuptor care funcționează cu păcură în comparație cu cel prezentat în cele ce urmează.

În tabloul nr. 1 sînt prezentate valorile medii pentru cele două perioade ale parametrilor care privesc combustibilul și procesul de ardere.

*Tabloul nr. 1*

**Parametrii combustibilului și procesului de ardere**

| Denumirea parametrului | Unitatea de măsură | Mărimea parametrului | |
|---|---|---|---|
| | | Perioada I | Perioada II |
| Consumul de gaz metan | $Nm^3/h$ | 2350 | 2512 |
| Presiunea gazului metan | mm col. Hg | 116,7 | 47,67 |
| Temperatura gazului metan la injector | °C | 10 | 10 |
| Presiunea aerului primar | mm col. apă | 45,1 | 44,4 |
| Temperatura aerului primar | °C | 34,85 | 44,4 |
| $CO_2$ în gaze de ardere | % | 16,91 | 21,21 |
| $O_2$ în gaze de ardere | „ | 2,55 | 1,13 |
| $CO + H_2$ în gaze de ardere | „ | 1,79 | 0,67 |
| Temperatura gazelor de ardere | °C | 275 | 325 |
| Tirajul în camera de praf | mm col. apă | 17,6 | 20,7 |
| Tirajul în conducta de aspirație a ventilatorului | „ | 34,8 | 39,8 |
| Temperatura clinkerului : | | | |
| — în zona de ardere | °C | 1456,5 | 1477,2 |
| — la intrarea în răcitoare | „ | 1168,5 | 1161,9 |
| — la ieșirea din răcitoare | „ | 226 | 236 |
| Temperaturile mantalei metalice la : | | | |
| 3,45 m de la capătul rece | „ | 54,8 | 51,8 |
| 13,60 m „ „ „ „ | „ | 84,4 | 97,9 |
| 23,75 m „ „ „ „ | „ | 120,9 | 145,5 |
| 33,85 m „ „ „ „ | „ | 159,8 | 171,8 |
| 44,00 m „ „ „ „ | „ | 193,8 | 201,3 |
| 54,10 m „ „ „ „ | „ | 239,3 | 244,5 |
| 64,25 m „ „ „ „ | „ | 191,9 | 187,8 |
| 74,35 m „ „ „ „ | „ | 262,8 | 273,1 |
| 84,50 m „ „ „ „ | „ | 185,8 | 183,0 |
| Presiunea atmosferică | mm col. Hg | 728,1 | 728,3 |
| Temperatura atmosferică | °C | 14,3 | 14,9 |
| Umiditatea relativă a aerului | % | 82,40 | 84,8 |
| Temperatura pastei de alimentare | °C | 28,7 | 27,7 |

În tabloul nr. 2 sînt prezentate valorile medii pentru cele două perioade ale parametrilor care privesc proprietățile fizico-chimice ale materiei prime cu care s-a alimentat cuptorul.

*Tabloul nr. 2*

**Parametrii materiei prime cu care s-a alimentat cuptorul**

| Denumirea parametrului | Unitatea de măsură | Mărimea parametrului | |
|---|---|---|---|
| | | Perioada I | Perioada II |
| Debitul de alimentare, | t/h | 27,04 | 30,24 |
| Umiditatea pastei : | | | |
| la intrarea în cuptor | % | 42,84 | 41,67 |
| ștuțul 1 | „ | 32,6 | 34,4 |
| ștuțul 2 | „ | 23,4 | 18,6 |
| ștuțul 3 | „ | 4,6 | 0,6 |
| $CO_3Ca$ în făină | „ | 76,48 | 76,34 |

*Tabloul nr. 2* *(urmare)*

| Denumirea parametrului | Unitatea de măsură | Mărimea parametrului | |
|---|---|---|---|
| | | Perioada I | Perioada II |
| *Analiza chimică* | | | |
| Pierdere la calcinare : PC | „ | 34,89 | 34,85 |
| $SiO_2$ | „ | 13,68 | 14,14 |
| $Fe_2O_3$ | „ | 2,25 | 2,28 |
| $Al_2O_3$ | „ | 4,19 | 3,97 |
| Ca O | „ | 42,82 | 42,64 |
| MgO | „ | 0,82 | 0,64 |
| Alcalii | „ | 0,84 | 0,80 |
| $SO_3$ | „ | 0,50 | 0,68 |
| | Total % | 100,00 | 100,00 |
| *Greutatea litrică* | | | |
| Finețea de măcinare | g/l | 1591,4 | 1600,7 |
| R 4900 | % | 7,14 | 5,56 |
| R 900 | „ | 0,825 | 0,69 |
| Calce standard | | 0,955 | 0,926 |
| Modul Si | | 2,132 | |
| Modul Al | | 1,908 | 1,747 |

*Tabloul nr. 3*

**Parametrii clinkerului rezultat**

| Denumirea parametrului | Unitatea de măsură | Mărimea parametrului | |
|---|---|---|---|
| | | Perioada I | Perioada II |
| Producția cuptorului | kg/h | 9138 | 10 770 |
| Greutatea litrică : | | | |
| fracțiunea 5—7 mm | g/l | 1371,9 | 1399,1 |
| necernut | „ | 1497,6 | 1492,3 |
| Granulația | | | |
| R 15 mm | % | 11,38 | 15,48 |
| R 7 „ | „ | 23,29 | 25,58 |
| R 3 „ | „ | 56,53 | 63,49 |
| R 1 „ | „ | 93,33 | 97,68 |
| *Analiza chimică* | | | |
| Pierdere la calcinare : PC | „ | 34,89 | 34,75 |
| $SiO_2$ + insolubil | „ | 21,82 | 22,16 |
| $Fe_2O_3$ | „ | 3,71 | 3,63 |
| $Al_2O_3$ | „ | 6,26 | 6,05 |
| CaO | „ | 66,52 | 66,09 |
| MgO | „ | 1,21 | 1,15 |
| $Na_2O$ | „ | 0,44 | 0,89 |
| $K_2O$ | | | |
| $SO_3$ | „ | 0,04 | 0,03 |
| | Total % | 100,00 | 100,00 |
| Modul Si | | 2,19 | 2,29 |
| Modul Al | | 1,68 | 1,69 |
| CaO liber | % | 0,52 | 0,68 |
| $C_3S$ | „ | 57,52 | 51,60 |
| $C_2S$ | „ | 19,38 | 24,51 |
| $C_3A$ | „ | 10,41 | 9,88 |
| $C_4AF$ | „ | 11,28 | 11,04 |
| Temperatura în zona de ardere | °C | 1456,5 | 1477,2 |

În tabloul nr. 3 sînt prezentate valorile medii pentru cele două perioade ale parametrilor care privesc proprietățile fizico-chimice ale clinkerului rezultat din cuptor în timpul încercărilor experimentale.

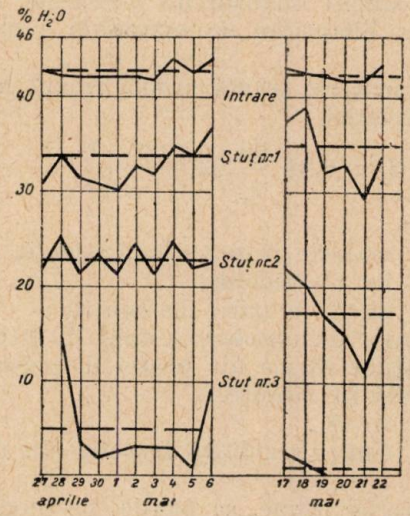



Fig. 2. — Variația umidității pastei.

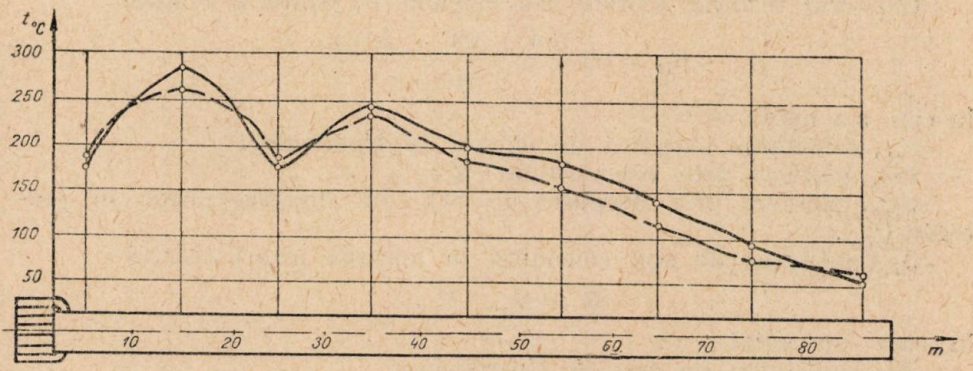



Fig. 3. — Variația temperaturii mantalei cuptorului.
---------- Temperaturi medii în prima perioadă
———— Temperaturi medii în perioada a doua.

În figura 2 sînt reprezentate variațiile valorilor medii zilnice ale umidității materiei prime la alimentare și la cele 3 ștuțuri prin care s-au luat probele.

În figura 3 este reprezentată variația temperaturii medii a tolei cuptorului în timpul încercărilor.

## BILANȚUL DE MATERIALE

Pentru a fi posibil să se întocmească bilanțul termic este necesar să se calculeze în prealabil bilanțul de materiale.

Pentru întocmirea bilanțului de materiale s-au folosit următoarele relații auxiliare:

1) Cantitatea de materie primă crudă uscată intrată în cuptor s-a calculat cu ajutorul relației

$$G_f = 0{,}31 \frac{60}{s_u} \gamma Z \frac{100 - H_2O}{100}, \qquad (1)$$

în care s-a notat cu:

$G_f$, cantitatea de materie primă crudă uscată, intrată în cuptor în perioada considerată în t/perioadă;

0,31, capacitatea în $m^3$ a oalei de control;

$s_u$, media timpurilor de umplere a oalei de 310 l în secunde;

$\gamma$, media greutăților litrice ale pastei în perioada respectivă kg/l.

$Z$, durata perioadei în minute.

$H_2O$, umiditatea în %.

2) Cantitatea de clinker rezultată teoretic din materia crudă uscată intrată în cuptor.

Prin arderea materiei prime, se pierde, pe lîngă pierderile prin calcinare determinate prin probe de laborator, și $SO_3$, precum și o parte din alcalii.

Clinkerul rezultat teoretic s-a calculat cu ajutorul relației

$$G_{ct} = G_f \frac{100 - (PC + SO_3)}{100},$$

în care s-a notat cu:

$G_{ct}$, cantitatea teoretică de clinker în t/perioadă;

PC, pierderi prin calcinare în %;

$SO_3$, pierderi prin degajare de $SO_3$ din materia primă în procente (%).

3) Cantitatea de apă conținută în materia primă (pastă):

$$W = G_p - G_f,$$

în care s-a notat cu:

$W$, cantitatea de apă în t/perioadă;

$G_p$, cantitatea de pastă în t/perioadă.

4) Cantitatea de $CO_2$ degajat din materia primă

$$G_{CO_2} = G_f \frac{PC}{100},$$

în care $G_{CO_2}$ este cantitatea de $CO_2$ în t/perioadă.

În această relație s-a considerat că întreaga pierdere la calcinare (PC) provine din transformarea $CaCO_3$ și $MgCO_3$ în $CO_2$.

În realitate însă din totalul pierderilor prin calcinare de 34,89% în prima perioadă și 34,85% în perioada a doua, aproximativ 1 ... 1,5%

provin din apa de constituție a argilei, care din motive de simplificare nu a fost luată în considerare, întrucît influențează în mică măsură componentele finale ale bilanțului termic.

5) Cantitatea de $SO_3$ degajat din materia primă:

$$G_{SO_3} = G_f \frac{SO_3}{100}.$$

6) Producția reală de clinker $G_{cr}$ s-a determinat prin cîntărire.

7) Pierderile prin praf:

$$P_{pr} = G_p - (G_{cr} + W + G_{CO_2} + G_{SO_3}),$$

în care s-a notat cu: $P_{pr}$, pierderi prin praf în t/perioadă.

Bilanțurile de materiale au fost calculate pentru fiecare zi pe valorile medii înregistrate orar. Valorile medii obținute pentru fiecare perioadă de încercare sînt redate în tabloul nr. 4.

*Tabloul nr. 4*

**Bilanțul de materiale**

| Denumirea parametrului | Unitatea de măsură | Mărimea parametrului | |
|---|---|---|---|
| | | Perioada I | Perioada II |
| *Intrări* | | | |
| Pastă | kg/h | 27,042 | 30,241 |
| *Ieșiri* | | | |
| Clinker | kg/h | 9,138 | 10,770 |
| Vapori de apă | „ | 11,587 | 12,598 |
| $CO_2$ | „ | 5,392 | 66,216 |
| $SO_3$ | „ | 79 | 120 |
| Pierderi prin praf | „ | 846 | 537 |
| Total ieșiri | kg/h | 27,042 | 30,241 |
| *Intrări* | | | |
| Pastă | kg/kg clinker | 2,960 | 2,808 |
| *Ieșiri* | | | |
| Clinker | „ | 1,000 | 1,000 |
| Vapori de apă | „ | 1,268 | 1,170 |
| $CO_2$ | „ | 0,590 | 0,577 |
| $SO_3$ | „ | 0,008 | 0,011 |
| Pierderi prin praf | „ | 0,094 | 0,050 |
| Total ieșiri | kg/kg clinker | 2,960 | 2,808 |
| *Intrări* | | | |
| Pastă | % | 100 | 100 |
| *Ieșiri* | | | |
| Clinker | „ | 33,78 | 35,61 |
| Vapori de apă | „ | 42,64 | 41,67 |
| $CO_2$ | „ | 19,93 | 20,55 |
| $SO_3$ | „ | 0,27 | 0,39 |
| Pierderi prin praf | „ | 3,38 | 1,78 |
| Total ieșiri | % | 100,00 | 100,00 |

Din examinarea figurii 2 se constată o variație relativ mare a umidității materiei prime care conduce la un regim variabil de temperatură din cuptor.

## BILANȚUL TERMIC

Calculul bilanțului termic s-a efectuat pe baza valorilor medii zilnice, din care s-a calculat apoi bilanțul termic mediu pe cele două perioade.

Bilanțul termic a fost întocmit în kcal/h ; kcal/kg clinker și procente din cantitatea de căldură intrată în cuptor.

În efectuarea calculelor s-au avut în vedere următoarele componente ale bilanțului termic :

### a. Intrări de căldură

1) din combustibil ;
2) cu aerul de ardere ;
3) cu materia primă.

### b. Ieșiri de căldură

1) consum de căldură teoretic necesar pentru formarea clinkerului ;
2) pierderi prin entalpia $CO_2 + CO$ rezultate din arderea combustibilului ;
3) pierderi prin entalpia $N_2$ din aerul teoretic de ardere ;
4) pierderi prin entalpia excesului de aer ;
5) pierderi prin entalpia vaporilor de apă rezultați din arderea combustibilului ;
6) pierderi prin ardere chimică incompletă ;
7) pierderi prin entalpia $CO_2$ din materia primă ;
8) pierderi din entalpia vaporilor de apă din materia primă ;
9) pierderi prin entalpia clinkerului ieșit din cuptor ;
10) pierderi în mediul ambiant prin mantaua cuptorului (convecție și radiație) ;
11) pierderi în mediul ambiant prin mantaua răcitoarelor (convecție și radiație) ;
12) pierderi nedeterminate.

### a. Intrări de căldură

1) Cantitatea de căldură din combustibil s-a calculat cu ajutorul relației

$$Q_c = B.\ P_{ci}\ ,$$

în care s-a notat cu :

$Q_c$, cantitatea de căldură introdusă în cuptor cu combustibilul în kcal/h ;

$B$, cantitatea de combustibil în $Nm^3/h$ ;

$P_{ci}$, puterea calorifică inferioară a combustibilului în $kcal/Nm^3$.

2) Cantitatea de căldură introdusă în cuptor cu aerul de ardere s-a calculat cu ajutorul relației

$$Q_a = G_a\, i_a\,,$$

în care s-a notat cu:

$Q_a$, cantitatea de căldură introdusă în cuptor cu aerul de ardere kcal/h;

$G_a$, cantitatea totală de aer introdusă în cuptor în $Nm^3/h$. Cantitatea teoretică de aer de ardere s-a calculat cu ajutorul relațiilor cunoscute, iar excesul de aer s-a calculat pe baza analizei gazelor de ardere;

$i_a$, entalpia aerului în condițiile sale de stare (presiune, umiditate, temperatură) în kcal/$Nm^3$.

3) Cantitatea de căldură introdusă în cuptor cu materia primă.

Calculul cantității de căldură introdusă în cuptor cu materia primă s-a efectuat considerîndu-se materia primă constituită din apă, clinker și $CO_2$:

$$Q_{mp} = G_{H_2O}\, i\, H_2O + G_c\, i_c + G_{CO_2\,(mp)}\, i_{CO_2}$$

în care s-a notat cu:

$Q_{mp}$, cantitatea de căldură introdusă în cuptor cu materia primă în kcal/h;

$i_{H_2O}$, entalpia apei la temperatura de intrare în cuptor a materiei prime în kcal/kg;

$i_c$, entalpia clinkerului la aceeași temperatură;

$i_{CO_2}$, entalpia $CO_2$ la aceeași temperatură în kcal/kg.

### b. Ieșiri de căldură

1) Consumul de căldură teoretic necesar pentru formarea clinkerului se arată în tabloul nr. 5 pentru încălzirea materialului și în tabloul nr. 6 pentru răcirea materialului. În calcul s-a adoptat metoda Anselm.

*Tabloul nr. 5*

**Cantitatea de căldură teoretic necesară arderii clinkerului**

**Încălzirea**

| Nr. crt. | Denumirea parametrului | Unități de măsură | Mărimea parametrului | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Perioada I | | Perioada II | |
| 1 | Încălzirea materialului crud de | kcal/kg clinker | 32,74 | | 30.56 | |
| | la 20°C pînă la 500°C (des- | „ | 14,05 | | 15,00 | |
| | hidratarea substanțelor | „ | 155,66 | | 150,24 | |
| | argiloase) | „ | 5,14 | | 3,93 | |
| | | „ | 0,60 | 208,19 | 1,56 | 201,29 |
| 2 | Deshidratarea caolinului la | | | | | |
| | 500°C | „ | 53,88 | 53,88 | 50,30 | 50,30 |
| 3 | Încălzirea materiei prime des- | „ | 17,70 | | 16,51 | |
| | hidratate între 500 și 800°C | „ | 10,21 | | 10.90 | |
| | | „ | 109,43 | | 105,62 | |
| | | „ | 3,04 | | 2,32 | |
| | | „ | 0,39 | 140,77 | 1,01 | 136,36 |

*Tabloul nr. 5* *(urmare)*

| Nr. crt. | Denumirea parametrului | Unităţi de măsură | Mărimea parametrului | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Perioada I | | Perioada II | |
| 4 | Decarbonatarea | kcal/kg clinker | 518,09 | | 500,05 | |
| | | „ | 9,52 | 527,61 | 7,28 | 507,33 |
| 5 | Încălzirea materialului decarbonatat între 800 şi 1450°C | „ | 106,64 | | 102,81 | |
| | | „ | 39,47 | | 36,81 | |
| | | „ | 21,91 | | 23,39 | |
| | | „ | 6,92 | | 3,29 | |
| | | | 0,91 | 175,85 | 2,36 | 170,66 |
| 6 | Diferenţa între căldurile specifice ale clinkerului la 1450°C | „ | 25,00 | 25,00 | 25,00 | 25,00 |
| 7 | Diferenţa totală pe izoterma de reacţie | „ | | 2,50 | | 2,50 |
| 8 | Consum pentru încălzirea şi decarbonatarea materiei crude | „ | −1138,8 | | | −1093,44 |

*Tabloul nr. 6*

**Cantitatea de căldură necesară arderii clinkerului**

**Răcirea**

| Denumirea parametrului | Unitatea de măsură | Mărimea parametrului | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Perioada I | | Perioada II | |
| Efectul exoterm la cristalizarea componenţilor amorfi ai metacaolin la aproximativ 690°C | kg/kg clinker | 14,98 | 14,98 | 13,97 | 13,97 |
| Efectul exoterm la formarea clinkerului (Bogue) $C_3S$ | „ | 113,22 | | 101,90 | |
| $C_2S$ | „ | 38,63 | | 50,47 | |
| $C_3A$ | „ | 15,85 | | 13,36 | |
| $C_4A$ | „ | 14,94 | 182, 64 | 14,61 | 180,34 |
| 10 % pentru neatingerea echilibrului | „ | — −18, 26 | 164,38 | — — 18,03 | 162,31 |
| Răcirea clinkerului de la 1450 la 20°C | „ | 353, 21 | 353,21 | 353,21 | 353,21 |
| Răcirea gazelor formate de la 900 (resp. 450°) la 20°C : | | | | | |
| din $CaCO_3$ | „ | 132,14 | | 127,49 | |
| din $MgCO_3$ | „ | 2,34 | 134,48 | 1,87 | 124,36 |
| Răcirea vaporilor cedaţi de caolinit de la 500° C pînă la 100°C | „ | 6,30 | | 5,91 | |
| Căldura de condensare la 100°C | | 17,79 | | 6.71 | |
| Răcirea de la 100 la 20°C | „ | 2,64 | 26,73 | 2,48 | 25,10 |
| Total recuperare | „ | | 678,8 | | 665,0 |
| Căldura necesară la încălzire | „ | | −1133,8 | | −1093,4 |
| Căldura necesară pentru arderea clinkerului | | | — 455,0 | | 428,4 |

2) Pierderi prin entalpia $CO_2 + CO$ rezultate din arderea combustibilului:

$$Q_{CO_2,CO} = G_{CO_2}\, i_{CO_2(ga)} + G_{CO}\, i_{CO(ga)},$$

în care:

$G_{CO_2}$ este cantitatea de $CO_2$ rezultat din arderea combustibilului în kg/h, iar

$i_{CO_2(ga)}$ entalpia $CO_2$ la temperatura gazelor de ardere în kcal/kg.

Pentru $G_{CO}$ și $i_{CO(ga)}$ aceeași semnificație ca mai sus.

3) Pierderile prin entalpia $N_2$ din aerul teoretic de ardere s-au calculat cu ajutorul relației

$$Q_{N_2} = 0{,}790\, L_{min}\, i_{N_2(ga)},$$

în care s-a notat cu:

$Q_{N_2}$, cantitatea de căldură pierdută prin entalpia $N_2$ din aerul teoretic de ardere în kcal/h;

$L_{min}$, cantitatea de aer teoretic necesară procesului de ardere în $Nm^3/h$;

$i_{N_2(ga)}$, entalpia $N_2$ la temperatura gazelor de ardere kcal/$Nm^3$.

4) Pierderile prin entalpia vaporilor de apă rezultați din arderea combustibilului s-au calculat conform relației

$$Q_{H_2O} = G_{H_2O}\, i_{H_2O(ga)},$$

în care s-a notat cu:

$Q_{H_2O}$, cantitatea de căldură evacuată prin vaporii de apă rezultați din arderea combustibilului în kcal/h;

$G_{H_2O}$, cantitatea de vapori de apă în kg/h;

$i_{H_2O(ga)}$ entalpia vaporilor la temperatura gazelor de ardere în kcal/kg.

5) Pierderile prin ardere chimică incompletă s-au calculat cu ajutorul relației

$$Q_{ch} = 3040 \cdot V_{CO},$$

în care

$Q_{ch}$ este cantitatea de căldură pierdută prin ardere chimică incompletă în kcal/h iar

$V_{CO}$ cantitatea de CO din gazele de ardere în $Nm^3/h$.

6) Pierderile prin entalpia $CO_2$ din materia primă s-au calculat prin relația

$$Q_{CO_2(mp)} = G_{CO_2(mp)} \cdot i_{CO_2(ga)},$$

în care

$Q_{CO_2(mp)}$ este cantitatea de căldură pierdută prin entalpia $CO_2$ din materia primă în kcal/h, iar

$i_{CO_2(ga)}$, entalpia $CO_2$ din materia primă în kcal/kg la temperatura gazelor de ardere.

7) Pierderile prin entalpia vaporilor de apă din materia primă s-au calculat cu ajutorul relației

$$Q_{H_2O(mp)} = G_{H_2O(mp)}\, i_{H_2O(ga)},$$

în care :

$Q_{H_2O(mp)}$ reprezintă cantitatea de căldură pierdută prin entalpia vaporilor de apă în kcal/h, iar

$i_{H_2O(ga)}$, entalpia vaporilor de apă din materia primă la presiunea parțială a vaporilor din gazele de ardere și la temperatura gazelor de ardere în kcal/kg.

8) Pierderile prin entalpia clinkerului ieșit din cuptor s-au calculat cu ajutorul relației

$$Q_{cl} = G_{cl}\, i_{cl},$$

în care :

$Q_{cl}$ reprezintă cantitatea de căldură evacuată cu clinkerul în kcal/kg, iar

$i_{cl}$, entalpia clinkerului la temperatura de ieșire din cuptor în kcal/kg.

9) Pierderile în mediul ambiant prin mantaua cuptorului. Acestea s-au calculat împărțind cuptorul în 9 zone, ale căror centre erau în locurile în care s-au montat termometrele de măsură.

S-a considerat în această situație că temperatura medie a zonei respective este temperatura indicată de termometru. S-a făcut după aceea calculul pierderilor de căldură pentru cuptor și pentru răcitoare.

Cantitatea de căldură pierdută printr-o zonă s-a calculat cu ajutorul relației

$$Q_{ma} = \alpha \cdot S \cdot \Delta t,$$

în care s-a notat cu :

$Q_{ma}$, cantitatea de căldură pierdută în mediul ambiant în kcal/h ;

$\alpha$, coeficientul global de transmisie a căldurii prin convenție și radiație în kcal/m²h°C ;

$S$, suprafața zonei respective în m² ;

$\Delta t$, diferența între temperatura peretelui cuptorului și temperatura mediului ambiant.

La efectuarea calculului s-a considerat o creștere a pierderii de 10% pentru suprafața zonei pentru bandaje, nituri, role etc.

La calculul pierderilor de căldură prin mantaua răcitoarelor s-a considerat că pierderea de căldură se efectuează numai prin 70% din suprafață, din cauza condițiilor speciale de montaj a acestora.

Diferența dintre cantitatea de căldură intrată și cantitatea de căldură utilă la care s-au adăugat pierderile a fost considerată ca pierderi nedeterminate și erori de măsură.

Rezultatele centralizate ale calculelor bilanțurilor termice sînt redate în tabloul nr. 7.

Bilanțul mediu s-a raportat la unitatea de timp (h), la 1 kg clinker și în procente din cantitatea de căldură intrată în cuptor.

*Tabloul nr. 7*

**Bilanțul termic orar, raportat la 1 kg clinker și procentual**

| Denumirea parametrului | Unitatea de măsură | Mărimea parametrului | | Unitatea de măsură | Mărimea parametrului | | Unitatea de măsură | Mărimea parametrului | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Perioada I | Perioada II | | Perioada I | Perioada II | | Perioada I | Perioada II |
| *Intrări de căldură:* | | | | | | | | | |
| Cu combustibilul | kcal/h | 20 057 325 | 21 431 601 | kcal/kg clinker | 2194,9 | 1990,5 | % | 97,28 | 97,11 |
| Cu aerul de ardere | ,, | 115 525 | 126 023 | ,, | 12,6 | 11,7 | ,, | 0,56 | 0,57 |
| Cu materia primă | ,, | 444 820 | 512 339 | | 48,7 | 47,6 | ,, | 2,16 | 2,32 |
| Total | kcal/h | 20 617 678 | 22 076 963 | kcal/kg clinker | 2256,2 | 2049,8 | % | 100,00 | 100,00 |
| *Ieșiri de căldură:* | | | | | | | | | |
| — Consum teoretic necesar | kcal/h | 4 157 833 | 4 614 010 | kcal/kg clinker | 455,0 | 428,4 | ,, | 20,17 | 20,90 |
| — Pierderi prin entalpia $CO_2$ + CO rezultate din arderea combustibilului | ,, | 333 024 | 359 249 | ,, | 36,4 | 33,3 | ,, | 1,61 | 1,62 |
| — Pierderi prin entalpia $N_2$ din aerul teoretic de ardere | ,, | 1 808 790 | 1 916 319 | ,, | 197,9 | 177,9 | ,, | 8,77 | 8,68 |
| — Pierderi prin entalpia excesului de aer | ,, | 266 143 | 195 875 | ,, | 29,1 | 18,2 | ,, | 1,29 | 0,89 |
| - Pierderi prin entalpia vaporilor de apă din combustibil | ,, | 424 338 | 440 660 | ,, | 46,4 | 40,9 | ,, | 2,06 | 1,99 |
| — Pierderi prin ardere chimică incompletă | ,, | 106 492 | 43 269 | ,, | 11,6 | 4,0 | ,, | 0,51 | 0,19 |
| — Pierderi prin entalpia $CO_2$ din materia primă | ,, | 407 064 | 465 034 | ,, | 44,5 | 43,2 | ,, | 1,97 | 2,10 |
| — Pierderi prin entalpia vaporilor de apă din materia primă | ,, | 8 651 621 | 9 406 120 | , | 946,8 | 873,3 | ,, | 41,96 | 42,60 |
| — Pierderi prin entalpia clinkerului ieșit din cuptor | ,, | 383 455 | 469 803 | ,, | 42,0 | 43,6 | ,, | 1,86 | 2,13 |
| — Pierderi în mediul ambiant prin mantaua cuptorului (convecție și radiație) | ,, | 2 106 096 | 2 218 534 | ,, | 230,5 | 206,0 | ,, | 10,21 | 10,06 |
| — Pierderi în mediul ambiant prin mantaua răcitoarelor (convecție și radiație) | ,, | 1 322 000 | 1 322 000 | ,, | 144,7 | 122,8 | ,, | 6,42 | 6,00 |
| — Pierderi nedeterminate | ,, | 650 819 | 626 090 | ,, | 71,3 | 58,2 | ,, | 3,17 | 2,84 |
| Total | kcal/h | 20 617 678 | 22 076 963 | kcal/kg clinker | 2256,2 | 2049,8 | % | 100,00 | 100,00 |

*Tabloul nr. 8*

**Calculul diagramei t—Q**
**Calculul căldurii necesare încălzirii materialului la 1450°C**

| Denumirea parametrului | | Unitatea de măsură | Valoarea parametrului | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Perioada I | | Perioada II | |
| Făină întrebuințată | | kg/kg clinker | 1,691 | | 1,638 | |
| Apă intrată | | kg/kg făină | 0,749 | | 0,717 | |
| „ „ | | kg/kg clinker | 1,266 | | 1,174 | |
| Temperatura pastei la intrare | | °C | 29 | | 30 | |
| Încălzire până la 100 °C | Încălzirea făinei | kcal/kg | 28,0 | | 26,7 | |
| | „ apei | „ | 89,9 | | 82,2 | |
| | Total | „ | 117,9 | 117,9 | 108,9 | 108,9 |
| *Evaporarea apei* | | kcal/kg | 682,7 | | 633,1 | |
| Pierderi prin manta (39 m lungime) | | „ | 47,2 | | 49,5 | |
| Total | | „ | 729,9 | 847,8 | 682,6 | 791,5 |
| Încălzire de la 100 la 800°C | Încălzirea materialului deshidratat 100—500°C | kcal/kg | 173,5 | | 167,7 | |
| | „ vaporilor de la 100—500°C | „ | 131,6 | 1152,9 | 122,1 | 1081,3 |
| | Deshidratarea caolinului | kcal/kg | 153,9 | 1206,8 | 50,3 | 1131,6 |
| | Încălzirea de la 500—800°C | kcal/kg | 140,8 | | 136,4 | |
| | Pierderi prin manta (10 m lungime) | „ | 31,7 | | 28,6 | |
| | Total | „ | 531,5 | 1379,3 | 505,1 | 1296,6 |
| *Decarbonatarea* | | | 527,6 | | 507,3 | |
| Pierderi prin manta (20 m lungime) | | kcal/kg | 78,2 | | 66,6 | |
| Total | | „ | 605,8 | 1985,1 | 573,9 | 1870,5 |
| Încălzirea de la 800 la 1450°C | Încălzirea între 800—960 °C | kcal/kg | 43,3 | | 42,0 | |
| | Efect exotermic, cristalizare, componenți amorfi | „ | —15,0 | | — 14,0 | |
| | Încălzire între 960—1450 °C | „ | 160,1 | | 156,2 | |
| | Efectul exotermic la formarea clinkerului | „ | —164,4 | | —162,3 | |
| | Pierderi prin manta | „ | 73,7 | | 63,0 | |
| | Total | „ | 97,7 | 2082,8 | 94,9 | 1965,4 |

*Tabloul nr. 9*

**Calculul diagramei t—Q**
**Calculul răcirii gazelor**

| | Denumirea parametrului | Unitatea de măsură | Mărimea parametrului | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Perioada I | Perioada II |
| Calculul temperaturii de ardere | Căldura intrată cu combustibilul | kcal/kg clinker | 2196,2 | 1990,5 |
| | Căldura intrată cu aerul primar | „ | 12,6 | 11,8 |
| | Volumul aerului secundar | $Nm^3$/kg clinker | 1958 | 1673 |
| | Temperatura clinkerului la ieșirea din răcitoare | °C | 226 | 236 |
| | Căldura cedată de clinker | kcal/kg clinker | 302 | 300 |
| | Căldura pierdută prin răcitoare | „ | 144,7 | 122,7 |
| | Căldura intrată cu aerul secundar | „ | 157,3 | 177,3 |
| | *Total căldură intrată* | kcal/kg clinker | 2366,1 | 2179,6 |

*Tabloul nr. 9* *(urmare)*

| | Denumirea parametrului | Unitatea de măsură | Mărimea parametrului | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Perioada I | Perioada II |
| Calculul temperaturii de ardere | Volum de gaze de combustie | $Nm^3$/kg clinker | 3,037 | 2,625 |
| | Căldura specifică medie la 2000 °C | kcal/$Nm^3$ °C | 0,395 | 0,395 |
| | Temperatura teoretică de ardere | °C | 1971 | 2102 |
| | Coeficient pirometric | — | 0,8 | 0,8 |
| | Temperatura reală de ardere | °C | 1577 | 1682 |
| Zona 800—1450 °C | Căldura cedată în zonă | kcal/kg clinker | 97,7 | 94,9 |
| | Entalpia gazelor la ieşirea din zonă | „ | 2266,9 | 2084,6 |
| | Căldura specifică medie a gazelor | kcal/$Nm^3$ °C | 0,395 | 0,395 |
| | Temperatura gazelor la ieşirea din zonă | °C | 1890 | 2010 |
| Zona de decarbonatare | Căldura cedată în zonă | kcal/kg clinker | 605,8 | 537,9 |
| | Entalpia gazelor la ieşirea din zonă | „ | 1661,1 | 1510,7 |
| | Căldura specifică medie a gazelor la 1450 °C | kcal/$Nm^3$ °C | 0,379 | 0,379 |
| | Temperatura la ieşire, neglijînd gazele din materia primă | °C | 1443 | 1518 |
| | Gaze degajate din materia primă | $Nm^3$/kg clinker | 0,598 | 0,565 |
| | Volum total de gaze | „ | 3,635 | 3,190 |
| | Aportul de căldură din gazele din materia primă | kcal/kg clinker | 134,5 | 124,4 |
| | Entalpia gazelor la ieşire | „ | 1795,6 | 1635,1 |
| | Căldura specifică medie gaze la 1300 °C | kcal/$Nm^3$ °C | 0,3918 | 0,3918 |
| | Temperatura gazelor la ieşirea din zonă | °C | 1261 | 1308 |
| Zona de încălzire între 500 şi 800°C | Căldura cedată în zonă | kcal/kg clinker | 172,5 | 165,0 |
| | Entalpia gazelor la ieşirea din zonă | „ | 1623,1 | 1470,1 |
| | Căldura specifică medie a gazelor la 1150 °C | kcal/$Nm^3$ °C | 0,3956 | 0,3956 |
| | Temperatura gazelor la ieşirea din zonă | °C | 1128 | 1165 |
| Zona de deshidratare a caolinului | Căldura cedată în zonă | kcal/kg clinker | 53,9 | 50,3 |
| | Entalpia gazelor la ieşirea din zonă | „ | 1569,2 | 1419,8 |
| | Căldura specifică medie a gazelor la 1150 °C | kcal/$Nm^3$ °C | 0,3956 | 0,3956 |
| | Temperatura gazelor la ieşirea din zonă | °C | 1091 | 1125 |
| Zona de încălzire între 100—500°C | Căldura cedată în zonă | kcal/kg clinker | 305,1 | 289,8 |
| | Entalpia gazelor la ieşirea din zonă | „ | 1264,1 | 1130,0 |
| | Căldura specifică medie a gazelor la 900 °C | kcal/$Nm^3$ °C | 0,3754 | 0,3754 |
| | Temperatura gazelor la ieşirea din zonă | °C | 926 | 944 |
| Zona de evaporare a apei | Căldura cedată în zonă | kcal/kg clinker | 729,09 | 682,6 |
| | Entalpia gazelor la ieşirea din zonă | „ | 534,2 | 447,4 |
| | Căldura specifică medie a gazelor la 400 °C | kcal/$Nm^3$ °C | 0,3529 | 0,3529 |
| | Temperatura gazelor la ieşirea din zonă | °C | 416 | 397 |
| Zona de încălzire pînă la 100 °C | Căldura cedată în zonă | kcal/kg clinker | 117,9 | 108,9 |
| | Entalpia gazelor la ieşirea din zonă | „ | 416,3 | 338,5 |
| | Căldura specifică medie la 300 °C | kcal/$Nm^3$ °C | 0,345 | 0,345 |
| | Temperatura gazelor la coş | °C | 332 | 307 |

*Tabloul*

**Calculul variației consumului de combustibil în funcție de**

| Denumirea parametrului | Unitatea de măsură | Mărimea parametrului | |
|---|---|---|---|
| | | 200° | 220° |
| Entalpia vaporilor supraîncălziți la temperatura gazelor la coș | kcal/kg | 687,3 | 696,6 |
| Căldura pierdută prin $H_2O$ din materia primă la 36 % $H_2O$ = 0,9225 kg/kg clinker | kcal/kg clinker | 634,0 | 642,6 |
| Căldura pierdută prin $H_2O$ din materia primă la 38 % $H_2O$ = 1,0051 kg/kg clinker | „ | 690,8 | 700,1 |
| Idem, 40 % $H_2O$ = 1,0933 kg/kg clinker | „ | 751,4 | 761,6 |
| „ 42 % $H_2O$ = 1,1876 „ | „ | 816,2 | 827,3 |
| „ 44 % $H_2O$ = 1,2886 | „ | 885,6 | 897,6 |
| Căldura pierdută prin $CO_2$ din materia primă la coș ($CO_2$ din materia primă considerată 0,31 $Nm^3$/kg clinker | „ | 26,7 | 29,5 |
| Consum total de căldură fără gazele de ardere în kcal/kg clinker | 36 % apă kcal/kg clinker | 1465,7 | 1477,1 |
| | 38 % „ | 1522,5 | 1534,6 |
| | 40 % „ | 1596,1 | 1596,1 |
| | 42 % „ | 1647,9 | 1661,8 |
| | 44 % „ | 1717,3 | 1732,1 |
| Pierderi prin $CO_2$ și CO din combustibil $CO_2$ — 2580 $Nm^3$/h | kcal/kcal din combustibil | 0,01023 | 0,01130 |
| Pierderi prin $N_2$ și excesul de aer 19 370 $Nm^3$/h | kcal/kcal din combustibil | 0,5533 | 0,06096 |
| Căldura luată de 1 kg de vapori pentru supraîncălzire | kcal/kg | 57,8 | 67,1 |
| Pierderi prin $H_2O$ din combustie | kcal/kcal din combustibil | 0,01104 | 0,01282 |
| Total pierderi prin gaze de combustie | kcal/kcal din combustibil | 0,0766 | 0,0851 |
| 36 % $H_2O$ *a.* Pierderi prin gaze la consum specific total | kcal/kg clinker | 121,08 | 137,4 |
| *b.* Consum de combustibil | „ | 1587,5 | 1614,5 |
| 38 % $H_2O$ *a.* Pierderi prin gaze | „ | 125,6 | 142,7 |
| *b.* Consum de combustibil | „ | 1648,1 | 1677,3 |
| 40 % $H_2O$ *a.* Pierderi prin gaze | „ | 131,3 | 148,5 |
| *b.* Consum de combustibil | „ | 1714,4 | 1744,6 |
| 42 % $H_2O$ *a.* Pierderi prin gaze | „ | 137,7 | 154,5 |
| *b.* Consum de combustibil | „ | 1784,6 | 1816,3 |
| 44 % $H_2O$ *a.* Pierderi prin gaze | „ | 142,1 | 161,1 |
| *b.* Consum de combustibil | „ | 1855,4 | 1893,2 |

Cu ajutorul calculelor din bilanțul termic s-a trasat diagrama $t - Q$ a cuptorului, redată în figura 4.

Calculele care au stat la întocmirea acestei diagrame sînt redate în tablourile nr. 8 și 9.

S-a întocmit totodată și diagrama din figura 5, în care s-a trasat variația consumului de combustibil la cuptor în cazul în care variază

*nr. 10*

**temperatura gazelor la coș și umiditatea materiei prime**

| temperatura gazelor la coș | | | | | | | Observații |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 240° | 260° | 280° | 300° | 320° | 340° | 360° | |
| 706,0 | 715,5 | 725,0 | 734,5 | 744,1 | 753,8 | 763,5 | |
| 561,2 | 660,0 | 668,8 | 677,6 | 686,4 | 695,4 | 704,3 | |
| 709,6 | 719,1 | 728,7 | 738,2 | 747,9 | 757,6 | 767,4 | |
| 771,9 | 782,2 | 792,6 | 803,0 | 813,5 | 824,1 | 834,7 | |
| 838,4 | 849,7 | 861,0 | 872,3 | 883,7 | 895,2 | 906,7 | |
| 909,7 | 922,0 | 934,2 | 946,5 | 958,8 | 971,3 | 983,8 | |
| 32,4 | 35,4 | 38,2 | 41,6 | 44,6 | 47,8 | 51,0 | |
| 1488,6 | 1500,4 | 1512,0 | 1524,2 | 1536,0 | 154°,2 | 1560,3 | |
| 1547,0 | 1559,5 | 1571,9 | 1584,8 | 1597,5 | 1610,4 | 1623,4 | |
| 1600,3 | 1622,6 | 1635,8 | 1649,6 | 1663,1 | 1676,9 | 1690,7 | |
| 1675,8 | 1690,1 | 1704,2 | 1718,9 | 1733,3 | 1748.0 | 1762,7 | |
| 1747,1 | 1762,4 | 1777,4 | 1793,1 | 1808,4 | 1825,9 | 1839,8 | |
| 0,01245 | 0,01361 | 0,01481 | 0,01596 | 0,01714 | 0,01837 | 0,01958 | S-a luat în kcal/kg din combustibil, căci nu se cunoaște consumul de căldură. Prin multiplicarea acestor cifre cu consumul specific în kcal/kg clinker se obțin pierderile în kcal/kg clinker |
| 0,06650 | 0,07216 | 0,07784 | 0,08353 | 0,09191 | 0,09497 | 0,10071 | |
| 76,5 | 86,6 | 95,5 | 105,0 | 114,6 | 124,3 | 134,0 | |
| 0,04161 | 0,01642 | 0,01824 | 0,02005 | 0,02189 | 0,02374 | 0,02559 | |
| 0,0926 | 0,1031 | 0,1118 | 0,1209 | 0,1309 | 0,1371 | 0,1459 | |
| 151,9 | 172,2 | 190,0 | 209,1 | 231,6 | 246,1 | 267,0 | |
| 1640,5 | 1672,6 | 1702,0 | 1733,3 | 1768,6 | 1794,3 | 1827,3 | |
| 157,8 | 179,4 | 197,9 | 217,6 | 240,8 | 255,8 | 277,2 | |
| 1704,8 | 1738,9 | 1769,8 | 1802,4 | 1838,3 | 1866,2 | 1980,6 | |
| 164,3 | 186,5 | 205,9 | 226,9 | 250,5 | 266,6 | 268,9 | |
| 1773,6 | 1819,1 | 1841,7 | 1876,5 | 1913,6 | 1943,5 | 1979,6 | |
| 170,8 | 194,2 | 214,6 | 236,3 | 261,0 | 277,7 | 301,1 | |
| 1845,6 | 1884,3 | 1918,8 | 1955,2 | 1994,3 | 2025,7 | 2063,8 | |
| 178,2 | 202,6 | 223,6 | 246,6 | 272,3 | 290,1 | 314,2 | |
| 1925,3 | 1965,0 | 200,10 | 2039,7 | 2080,7 | 2116,0 | 2154,0 | |

umiditatea materiei prime și temperatura gazelor la coș. În trasarea acestei diagrame s-a impus ipoteza simplificatoare că variația unuia dintre parametri nu implică decît variația consumului de combustibil. Această diagramă va fi verificată experimental și corectată cu influența mutuală a parametrilor. Rezultatele calculelor care au servit la trasarea acestei diagrame sînt prezentate în tabloul nr. 10.

Din examinarea componentelor bilanțului termic se constată că majoritatea pierderilor de căldură o constituie de fapt:

*a*) entalpia vaporilor rezultați din umiditatea materiei prime (41,96%) în prima perioadă și 42,60% în perioada a doua);

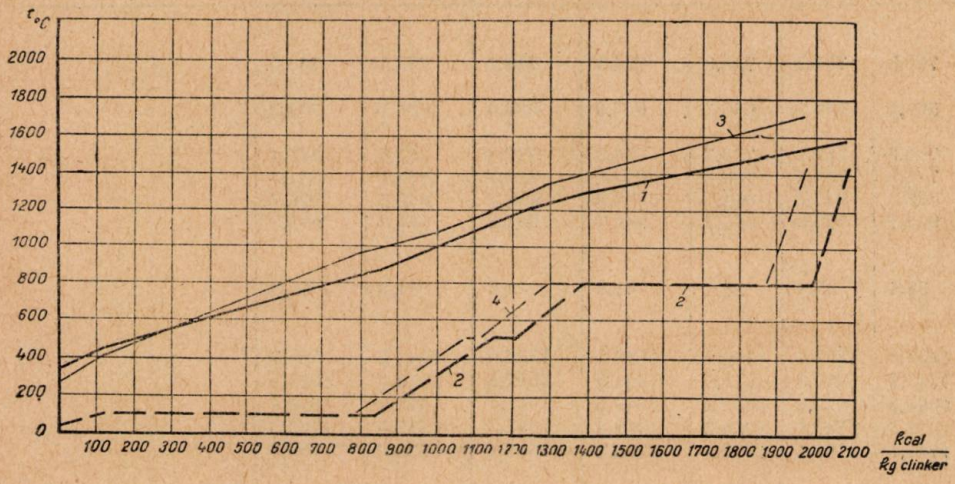



Fig. 4. — Diagrama $t - Q$

*1*, variația temperaturii gazelor de ardere în prima perioadă; *2*, variația temperaturii materiei prime în prima perioadă; *3*, variația temperaturii gazelor de ardere în perioada doua; *4*, variația temperaturii materiei prime în perioada a doua.

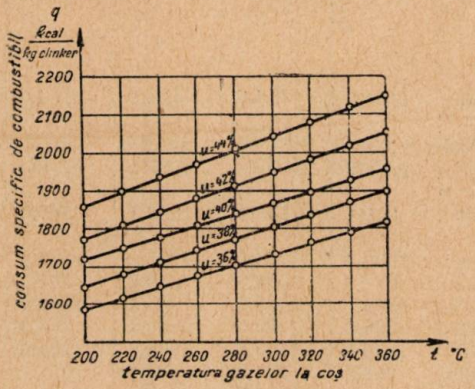



Fig. 5. — Variația consumului specific de combustibil în funcție de umiditatea pastei $u$ și în funcție de temperatura gazelor de ardere $t$.

*b*) entalpia gazelor de ardere evacuate din cuptor la temperatura de 300°C (16,21% în prima perioadă și 15,47% în perioada a doua);

*c*) pierderile în mediul ambiant prin mantaua cuptorului și a răcitoarelor de clinker (16,63% în prima perioadă și 16,06% în perioada a doua).

Avînd în vedere această situație care conduce la consumuri de căldură din combustibil de 2195 kcal/kg clinker în prima perioadă de măsură și 1990 kcal/kg clinker în perioada a doua, este necesar ca să se ia următoarele măsuri pentru reducerea consumului de combustibil:

*a*) Măsuri care privesc procesul tehnologic. Aceste măsuri de ordin tehnic privesc în special procesul de pregătire a materiei prime. Din acestea fac parte:

1° Controlarea compoziției chimice adecvate la materia primă și menținerea acestei compoziții în limite cît mai constante posibil.

2° Reducerea conținutului de apă din materia primă printr-o măcinare adecvată și prin folosirea procedeului de fluidif care a pastei cu ajutorul reactivilor alcalini din cărbune. Reducerea cu 1% din apă conduce la o scădere corespunzătoare a consumului de combustibil.

*b*) Măsuri care privesc procesul pirotehnologic:

1° Studierea unor injectoare de gaz metan adecvate special cuptoarelor de clinker.

2° Intensificarea transmisiei căldurii prin radiație în zona de clinkerizare prin adaos de combustibil lichid în gazul metan.

3° Studierea și adaptarea a încă unui recuperator de căldură pe lîngă zona de lanțuri.

4° Reducerea pierderilor de căldură prin mantaua cuptorului prin izolarea termică cu cărămizi izolante montate în interiorul cuptorului sub cărămida refractară.

5° Recuperarea materiei prime din gazele de ardere prin montarea fie a unor filtre electrostatice, fie a unor scrubere.

## О РАСХОДЕ ГОРЮЧЕГО В РАБОТАЮЩИХ НА БОЛОТНОМ ГАЗЕ КЛИНКЕРНЫХ ПЕЧАХ, ПОСТРОЕННЫХ ЗАВОДОМ «23 АВГУСТА»

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

В настоящей статье приводятся опытные результаты, полученные исследовательской группой при проведенных ею испытаниях клинкерной печи.

Приводятся также материальный и тепловой балансы и на их основании устанавливаются меры, которые необходимо принять для уменьшения расхода горючего.

В заключение строится диаграмма, представляющая изменения расхода горючего в зависимости от имеющих наибольшее значение параметров печи (влажность вводимой пасты и температура сжигаемых газов).

## ОБЪЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1. — Измерительная аппаратура печи: *1* — аппарат для измерения дебита и давления природного газа; *2* — аппарат для измерения дебита первичного воздуха; *3* — аппарат для измерения давления первичного воздуха; *4* — аппарат для измерения температуры первичного воздуха; *5* — аппарат для измерения давления природного газа в теле форсунки; *6* — аппарат для измерения температуры в рабочем пространстве; *7* — аппарат для измерения температуры клинкера; *8* — аппарат для измерения температуры кожуха печи; *9* — патрубок для выемки проб материала; *10* — приспособление для захвата проб топочных газов; *11* — аппарат для измерения температуры топочных газов; *12* — аппарат для измерения тяги в трубе; *13* — аппарат для измерения температуры сырья; *14* — горшок размером в 0,31 м³ для измерения дебита сырья; *15* — место выемки проб материала.

Рис. 2. — Изменения влажности пасты.

Рис. 3. — Изменения температуры кожуха печи. Сплошная линия — средняя температура в первый период. Прерывистая линия — средняя температура во второй период.

Рис. 4. — Диаграмма $t—Q$: *1* — изменения температуры топочных газов в первый период; *2* — изменения температуры сырья в первый период; *3* — изменения температуры топочных газов во второй период; *4* — изменения температуры сырья во второй период.

Рис. 5. — Изменения удельного потребления горючего в зависимости от влажности пасты и от температуры топочных газов *t*.

# SUR LA CONSOMMATION DE COMBUSTIBLE, LORS DU FONCTIONNEMENT AU GAZ MÉTHANE, DES FOURS À CLINKER FABRIQUÉS DANS LES USINES «23 AOÛT»

(RÉSUMÉ)

Cet article expose les résultats expérimentaux, obtenus lors des essais faits par une équipe de chercheurs sur un four à clinker.

On présente, en même temps, les bilans de matériaux et les bilans thermiques obtenus et on en déduit les mesures à prendre en vue de réduire la consommation de combustible.

Pour conclure, l'auteur établit un diagramme représentant la variation de la consommation de combustible en fonction des principaux paramètres du four (humidité de la pâte et température des gaz de combustion).

## EXPLICATION DES FIGURES

Fig. 1. — Dotation du four avec des appareils de mesure : *1*, appareil pour mesurer le débit et la pression du méthane ; *2*, appareil pour mesurer le débit de l'air primaire ; *3*, appareil pour mesurer la pression de l'air primaire ; *4*, appareil pour mesurer la température de l'air primaire ; *5*, appareil pour mesurer la pression du méthane dans le corps de l'injecteur ; *6*, appareil pour mesurer la température dans l'espace utile du four ; *7*, appareil pour mesurer la température du clinker ; *8*, appareil pour mesurer la température du revêtement du four ; *9*, tubulures pour prélever des échantillons de matériel ; *10*, prise pour prélever des échantillons de gaz de combustion ; *11*, appareil pour mesurer la température des gaz de combustion ; *12*, appareil pour mesurer le tirage de la cheminée ; *13*, appareil pour mesurer la température de la matière première ; *14*, pot d'une capacité de 0,31 m³ pour mesurer le débit de matière première ; *15*, point de prélèvement des échantillons de matériel.

Fig. 2. — Variations de l'humidité de la pâte.

Fig. 3. — Variations de la température du revêtement du four. Trait plein : températures moyennes durant la première période ; tirets : températures moyennes durant la seconde période.

Fig. 4. — Diagramme $t - Q$ ; *1*, Variations de la température des gaz de combustion durant la première période ; *2*, variations de la température de la matière première durant la première période ; *3*, variations de la température des gaz de combustion durant la seconde période ; *4*, variations de la température de la matière première durant la seconde période.

Fig. 5. — Variations de la consommation spécifique de combustible en fonction de l humidité de la pâte $u$, ainsi qu en fonction de la température des gaz de combustion, $t$.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 4, 1956

*COMBUSTIBILI SOLIZI*

# ELEMENTE CARACTERISTICE ÎN PROCESUL DE COCSIFICARE A CĂRBUNELUI

NOTA I

## ASUPRA BITUMENULUI DIN CĂRBUNII COCSIFICABILI *)

DE

I. L. BLUM

### COCSURILE DE PETROL

Într-o lucrare anterioară [1] ne-am ocupat de anumite însuşiri ale cocsurilor de petrol provenite din procesele de cracking din industria de petrol şi anume, de modul de comportare la pirogenarea ulterioară a lor. Cocsul de petrol este reziduul solid, poros, rezultat fie din distilarea pînă la sec a unui ţiţei, fie produs prin cracarea specială a fracţiunilor grele din ţiţei, cu depunere de carbon.

Cocsurile de petrol mai pot proveni din instalaţiile Knowles [2]. Cocsurile din instalaţiile Knowles nu prezintă interes pentru problema pe care ne-am propus s-o dezbatem, dat fiind că dau procente mici de materii volatile şi reziduul de la repirogenare este pulverulent.

Condiţiile fizice în care se face cracarea fracţiunilor grele, în industria de petrol, au creat două procedee generale de cracare termică**) şi anume :

*a*) cracarea la presiuni joase (0,5—4 at), dar la temperaturi înalte (600—640 °C), cunoscută sub denumirea de cracare în fază de vapori, şi

*b*) cracarea la presiuni înalte (25—55 at) şi temperaturi moderate (450—550°C), denumită cracare în fază lichidă.

Presiunile joase fac ca reacţiile de polimerizare şi copolimerizare să prezinte o intensitate oarecum redusă; cantitatea mică de polimeri formată dă puţine reziduuri solide, cantitate redusă atît de asfaltene, cît şi

*) Lucrare prezentată Institutului de energetică la data de 21 martie 1956.
**) Denumire care urmăreşte diferenţierea faţă de cracarea catalitică.

de carboide. Totuși, polimerizarea poate deveni activă și la presiuni joase, numai dacă temperaturile utilizate devin mult mai ridicate, peste 650°, chiar pînă la 700°C, dar se soldează cu producere de hidrocarburi aromatice. De altfel, temperaturile ridicate duc la un procedeu cunoscut sub denumirea de aromatizare pirogenetică. Durata prelungită poate duce însă chiar la copolimerizări cu formare de rășini și de carboide.

Presiunile înalte favorizează cracarea pînă la reziduu solid, în care factorul durată are un rol deosebit, astfel încît se ajunge la o dehidrogenare foarte accentuată cu formare de carboide solide necracabile. Aceste carboide, alcătuite din particule de dimensiuni coloide, se aglomerează treptat, formînd cocsul de petrol.

Cracarea pînă la cocs se caracterizează deci, prin copolimerizare și asfaltizare succesivă a fracțiunilor grele, concomitent cu dehidrogenarea, ceea ce constituie cauza principală a formării cocsului.

Cocsurile de petrol, astfel obținute, alcătuiesc deci o diversitate de categorii, în funcție de gradul de cracaj la care au fost supuse în camera de cracking. Compoziția și proprietățile cocsurilor de petrol depind desigur de materia primă supusă cracajului, de predominanța unor sau altor clase

*Tabloul*

**Caracteristicile chimico-tehnice**

| | Nr. crt. al probei | Compoziția generală | | | Cocsificarea (mat. uscat) | | | Puterea cal. super. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Apă % | Cenușă % | Subst. comb. % | Cocs % | Mat. volat. % | Cărb. fix % | kcal/kg |
| Cocs de înaltă presiune | 1 | 1,02 | 1,60 | 97,38 | 93,75 | 6,25 | 91,13 | 8616 |
| | 2 | 0,51 | 1,71 | 98,78 | 93,05 | 6,95 | 91,83 | 8640 |
| | 3 | 0,32 | 0,98 | 98,70 | 91,07 | 8,93 | 89,77 | 8695 |
| | 4 | 1,75 | 0,85 | 97,40 | 89,59 | 10,41 | 86,99 | 8854 |
| Cocs de joasă presiune | 5 | 1,46 | 0,95 | 97,59 | 85,67 | 14,33 | 84,26 | 8873 |
| | 6 | 1,27 | 0,98 | 97,85 | 81,50 | 18,50 | 78,25 | 9000 |
| | 7 | 1,53 | 1,01 | 97,46 | 79,59 | 20,41 | 77,05 | 9026 |
| | 8 | 2,08 | 1,31 | 96,61 | 73,17 | 26,83 | 71,86 | 9143 |
| | 9 *) | 1,51 | 0,93 | 97,56 | 84,29 | 15,71 | 81,25 | 8913 |
| | 10 | 2,36 | 1,75 | 95,89 | 36,84 | 63,16 | 34,48 | 9316 |

*) Proba nr. 9 a fost obținută din amestecarea a: 30% din proba nr. 4 și 70% din proba nr. 6.

de hidrocarburi, dar sînt legate de durata și intensitatea cracării. Ca o primă diferențiere și cea mai importantă, a gradului de cracare, am folosit procentul de materii volatile care, la cocsurile de petrol poate varia de la 0% — cocsuri seci — pînă la cifre care depășesc 50—60%, astfel încît, pentru acestea din urmă, însuși aspectul materialului ne arată că denu-

mirea de cocs nu mai este indicată. Mecanismul formării cocsului de petrol, comportînd o succesiune de dehidrogenări și de scindări de hidrocarburi din complexul de reziduuri grele, produsul format conține și carbon elementar, dar trebuie considerat mai ales ca fiind alcătuit dintr-un complex de carbon, de hidrocarburi nesaturate cu greutăți mole ulare foarte mari și substanțe smoloase. Variația în procentul de materii volatile, la diverse cocsuri de petrol, duce la concluzia că termenul de cocs de petrol este cu totul generic, incluzînd o gamă foarte mare de cocsuri; fiecare cocs însă, poate fi caracterizat, în special, prin procentul de materii volatile, care alcătuiește astfel o caracteristică a sa susceptibilă de a-l diferenția, atît constituțional, cît și în însușiri. Procentul de materii volatile se determină prin metode analoge celor aplicate cărbunilor fosili, adică cocsificarea, în creuzet de platină, a unui gram de cărbune pulverizat și pastilat.

În lucrarea noastră menționată, am arătat că unele categorii de cocsuri de petrol, supuse unei pirogenări ulterioare, adică cocsificate în condiții analoge celor aplicate huilelor, dau un cocs compact, dur, foarte asemănător cocsurilor din huilele de cocs, atît prin caracteristicile lor fizico-

*nr. 1*

**ale probelor de cocs de petrol**

| Sulf | | | Compoziția elementară | | | | | Fuel ația | Aspectul cocsului obținut din redistil. cocsului de petiol |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| total % | fix % | comb. % | C % | H % | S % | N % | O % | cărb. fix / mat. volatile | |
| 0,66 | 0,22 | 0,44 | 92,89 | 2,43 | 0,44 | 0,60 | 1,02 | 14 | Pulverulent |
| 0,62 | 0,08 | 0,54 | 92,87 | 2,43 | 0,54 | 0,63 | 1,30 | 13 | Pulverulent |
| 0,53 | 0,01 | 0,52 | 92,80 | 2,97 | 0,52 | 0,57 | 1,84 | 9 | Pulverulent |
| 0,61 | 0,19 | 0,42 | 92,00 | 3,36 | 0,42 | 0,63 | 0,99 | 8 | Pulv. slab aglomerat. |
| 0,75 | 0,39 | 0,36 | 91,35 | 3,36 | 0,36 | 0,60 | 1,65 | 6 | Cocs compact |
| 0,73 | 0,27 | 0,46 | 91,23 | 3,83 | 0,47 | 0,47 | 1,75 | 4 | Compact, topit, slab spongios |
| 0,55 | 0,09 | 0,46 | 90,16 | 4,00 | 0,46 | 0,53 | 2,31 | 3 | Topit, spongios |
| 0,46 | 0,11 | 0,35 | 87,13 | 6,15 | 0,35 | 0,41 | 2,57 | 3 | Topit, f. spongios |
| 0,62 | 0,19 | 0,43 | 91,43 | 3,62 | 0,43 | 0,51 | 1,57 | 4 | Compact, dur |
| 0,59 | 0,03 | 0,56 | 84,40 | 9,13 | 0,56 | 0,51 | 1,29 | 1 | Coajă de cocs |

chimice, cît și din punctul de vedere al structurii și al rezistenței mecanice. Alte cocsuri de petrol se comportă ca niște huile de gaz, adică la recocsificarea lor lasă un reziduu cocsificat dar mai spongios. În sfîrșit, altele se comportă ca și huilele antracitoase, lăsînd de asemenea un reziduu, dar acesta este pulverulent sau cu slab început de aglomerare.

Pentru o clasificare rațională a cocsurilor de petrol am arătat modul de comportare al lor în tratamentul pirogenetic ulterior în funcție de materiile volatile degajate. În tabloul nr. 1 [1] sînt trecute caracteristicile chimico-tehnice ale unor tipuri reprezentative de cocsuri de petrol, așezate în ordinea crescîndă a procentelor de materii volatile.

Datele analitice și compoziția elementară a cocsurilor de petrol, ca și aspectul butonilor de cocs, după executarea operației de determinare a materiilor volatile, acuză o foarte apropiată asemănare cu huilele. Această asemănare merge chiar mai departe, încît, atît gudroanele cît și gazele, adică materiile volatile degajate la recocsificare, au compoziția foarte apropiată de aceea a gudroanelor și gazelor rezultate din cocsificarea huilelor; bineînțeles că randamentele și constituția lor chimică variază în funcție de particularitățile cocsurilor de petrol ce au fost supuse pirogenării ulterioare. Randamentul și compoziția gazelor de la pirogenarea cocsurilor de petrol, sînt arătate în tabloul nr. 2.

*Tabloul nr. 2*

**Compoziția gazelor de pirogenare a cocsurilor de petrol**

| Nr. crt. al probei | Procente de mat. volatile în materialul inițial % | Cantitatea de gaze obținute, calculate la tona de cocs de petrol, $m^3/t$ | Compoziția gazelor fără aer: | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $CO_2$ % | $H_2S$ % | $C_nH_{2n}$ % | $O_2$ % | $H_2$ % | CO % | $CH_4$ și homol. % | $N_2$ prin dif. % |
| 1 | 6,25 | 159 | — | — | — | — | 89,0 | 0,4 | 4,4 | 6,2 |
| 2 | 6,95 | 163 | — | urme | — | — | 88,2 | 0,4 | 3,6 | 7,8 |
| 3 | 8,93 | 261 | — | urme | — | — | 89,7 | 0,8 | 4,2 | 5,3 |
| 4 | 10,41 | 277 | — | — | — | — | 84,3 | 0,2 | 6,4 | 9,1 |
| 5 | 14,83 | 289 | — | — | — | — | 86,7 | 0,6 | 5,6 | 7,1 |
| 6 | 18,53 | 310 | — | urme | — | — | 81,5 | 0,9 | 9,3 | 8,3 |
| 7 | 20,41 | 315 | — | urme | — | — | 78,5 | 0,8 | 12,2 | 8,5 |

Din cercetarea acestui tablou desprindem următoarele:

1. Cantitatea de hidrogen rezultată este foarte mare în compoziția procentuală a gazelor.
2. Lipsește total $CO_2$.
3. Cantități foarte mici de CO.
4. Prezență de azot, în gaz, rezultat din compușii cu azot din cocsul de petrol inițial.

Gudroanele s-au dovedit foarte bogate în hidrocarburi aromatice, cu predominanța naftalinei.

În sfîrșit, am arătat că apele pirogenetice, ca și în cazul huilelor, sînt ape amoniacale, corespunzătoare unei transformări pînă la 25% din azotul aflat în compoziția elementară a cocsurilor de petrol studiate. Aceste ape, dată fiind cantitatea redusă de apă de îmbibație preexistentă, sînt formate aproape exclusiv pirogenetic. Prezența azotului în țițeiuri s-ar

datori unor resturi proteice și cum se vede, se acumulează în reziduul solid de la cracarea fracțiunilor grele de țiței. Distribuirea azotului, la cocsificarea huilelor, în gudroane și gaze, sub formă de amoniac, grupări cianogenice și baze piridinice, precum și sub formă de azot elementar, o găsim și la recocsificarea cocsurilor de petrol. Multiplele asemănări dintre modul de comportare al cocsurilor de petrol cu acela al huilelor, în procesul de pirogenare a lor, duc la concluzia că trebuie să existe și o oarecare asemănare constituțională a lor. Dat fiind că în huile avem ca predominanță constituția humică, generată de componenții ligno-celulozici genetici, constituție humică ce nu poate fi existentă în cocsurile de petrol, rezultă că produsele volatile degajate în procesul pirogenetic, din cocsurile de petrol își pot găsi corespondentul în huile, în componenții asemănători bitumenelor, fie că ele sînt preexistente în parte, fie că ele se formează ca produse secundare prin pirogenarea huilelor.

Diferența accentuată în procentajul de materii volatile, între huilele și cocsurile de petrol care dau butoni de cocs de rezistență mecanică egală, trebuie căutată, în special, în componentul vitritic al huilelor.

Se observă, de asemenea, că cocsurile de petrol, mai ales cele sărace în materii volatile, dau gaze foarte bogate în hidrogen. Din acest punct de vedere, cocsurile de petrol, mai sărace în materii volatile, pot fi comparate cu antraciții care, cum a arătat L e b e a u [3], dau la cocsificare gaze foarte bogate în hidrogen.

Absența $CO_2$, ca și micile procente de CO în gazele rezultate din pirogenarea tuturor tipurilor de cocs de petrol studiate, pot fi explicate prin absența unor procente mai însemnate de oxigen constituțional.

Am putea, comparativ, să conchidem că $CO_2$ și CO din constituția gazelor de la pirogenarea cărbunilor fosili se datorește exclusiv masei humice, și constituie o caracteristică a sa, mai ales că, în diferitele stadii de metamorfozare a cărbunilor fosili, cantitatea de CO, dar mai ales de $CO_2$ de la degazarea pirogenetică a cărbunilor fosili, reprezintă tocmai aceste stadii [4].

Mai mult chiar, nu am reușit să stabilim prezența fenolocrezolilor în gudroanele formate din cocsurile de petrol recocsificate *).

În ceea ce privește caracterele reziduului de la recocsificare, se constată că cocsurile de petrol, cu procente de materii volatile cuprinse, aproximativ, între 13 și 18%, s-au dovedit că dau, la pirogenare, reziduurile cele mai compacte, deci formează un cocs asemănător huilelor de cocs. Procentul optim de materii volatile are valoare relativă și poate fi, pentru unele cocsuri de petrol, mai mare sau mai mic.

Ca și în cazul huilelor cocsificabile, cocsul de petrol susceptibil să dea, prin recocsificare, reziduuri solide compacte, se plastifiază înainte de a forma acest reziduu compact, condiție necesară pentru aglutinare și cocsificare. Plastifierea se face după o curbă care are oarecare asemănări cu curbele de plastifiere ale huilelor. Astfel, la aparatul Kattwinkel-Baum-Shimomura, alura de cădere a curbei de plastifiere pentru o huilă de gaz

*) O lucrare pe care o avem în curs va adînci mai mult cercetarea compoziției gudronului format la repirogenarea cocsurilor de petrol.

— Lupeni —, o huilă de cocs — Anina — și un cocs de petrol de cracking, este arătată în graficul din figura 1.

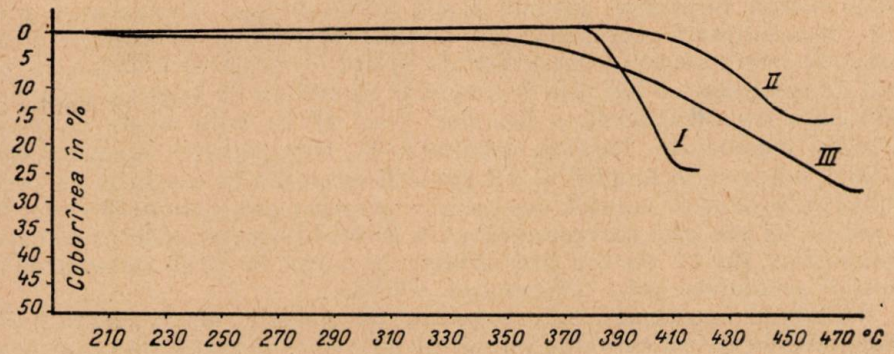



Fig. 1. — Alura de cădere a curbei de plastifiere la o huilă de gaz (I). o huilă de cocs (II) și un cocs de petrol (III).

Principalele particularități chimico-tehnice ale cărbunilor comparați sînt următoarele :

| | I. *Lupeni* | II. *Anina* | III. *Cocs de petrol* |
|---|---|---|---|
| Umiditate % | 1,86 | 1,55 | 1,46 |
| Cenușă % | 7,23 | 7,75 | 0,95 |
| Mat. volatil. % | 38,44 | 28,14 | 14,33 |

Intervalul plastic este foarte lung pentru cocsul de petrol menționat, pentru că începutul de înmuiere este foarte jos și solidificarea mult întîrziată, dar căderea curbei este cam de același ordin de mărime.

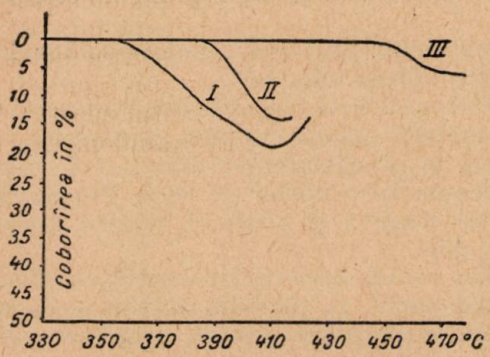



Fig. 2. — Variație în alura de cădere a curbei de plastifiere la o huilă de gaz — Uricani — în raport cu procentul de steril conținut.

Fără îndoială că intervalul de înmuiere este dependent în primul rînd de elementul plastic, bitumenele, a căror prezență cantitativă și calitativă, în perioada de plastifiere, determină însuși caracterul de plastifiere. Rezultă că un factor important va fi raportul între elementul plastic și cel neplastic (masa cărbunoasă), aceasta din urmă fiind caracterizată printr-un complex care se dezagregă sub acțiunea termică, se dispersează în masa vîscoasă a bitumenelor dar nu posedă însăși plastifiante.

Un alt factor care influențează intervalul plastic, începutul și finalul de înmuiere, ca și căderea curbei de plastifiere, este însăși cantitatea de cenușă din cărbuni, respectiv sterilul conținut. Iată de pildă

alura curbei de plastifiere pentru diferite probe din huila de gaz — Uricani — cu procente de cenușă variabilă (fig. 2).

*Uricani*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Cenușă % | I. 7,65 | II. 19,11 | III. 41,78 |
| Început de înmuiere a cărbunelui | 360° | 390° | 450° |

sau pentru altă huilă de gaz — Lupeni — de asemenea cu procente de cenușă variabilă (fig. 3).

*Lupeni*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Cenușă % | I. 7,23 | II. 10,86 | III. 28,83 |
| Început de înmuiere a cărbunilor | 375° | 405° | 415° |

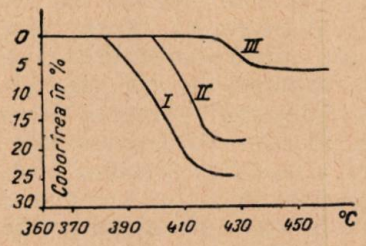



Fig. 3. — Alura de cădere a curbei de plastifiere la o huilă de gaz — Lupeni — în raport cu procentul de steril conținut.

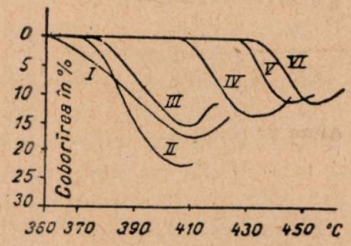



Fig. 4. — Alura de cădere a curbei de plastifiere a unei huile de gaz — Uricani — în raport cu diferitele sorturi granulometrice, separate după spălare.

din care reiese că conținutul de steril influențează alura curbei și intervalul de plastifiere.

Curba de plasticitate variază și în raport cu clasa granulometrică extrasă din cărbuni; aceasta poate fi tradusă prin dependență față de componentul petrografic predominant. Astfel, de exemplu, pentru huila de gaz Uricani, spălată, alura curbei, cum se vede în graficul din figura 4, este diferită atît ca interval — început de înmuiere și sfîrșitul plasticității — cît și ca alură de cădere a curbei în raport cu sortul granulometric.

| *Sort granulometric* | *Cenușă %* | *Sort granulometric* | *Cenușă %* |
|---|---|---|---|
| I. Peste 50 mm | 7,83 | IV. 10—5 mm | 7,66 |
| II. 50—25 mm | 7,65 | V. 5—3 mm | 8,15 |
| III. 25—10 mm | 8,03 | VI. 3—1 mm | 7,24 |

Urmărind alura de cădere a curbei de plastifiere la cocsul de petrol menționat, se observă o cădere lentă pe un interval lung, cădere care devine bruscă mai tîrziu (fig. 1). Particularitățile curbei de plasticitate la cocsurile de petrol sînt mai puțin influențate de steril, dat fiind că ele conțin cantități mici de cenușă, astfel încît *nu* apare acea frînare a punctului de înmuiere, care întîrzie începutul de plastifiere. Dar la anumite cocsuri de petrol, ca și la huilele cocsificabile, avem acea plastifiere prealabilă, care constituie condiția de formare a unui reziduu cocsificat.

**Extracția cu solvenți a cocsurilor de petrol**

Huilele sînt alcătuite dintr-un complex cu predominanța componenților organici de natură humică, a căror compoziție chimică este încă insuficient lămurită. Însușirea de aglutinare a lor, cu formare de cocsuri, în raport cu felul huilei, de la cele mai slab aglomerate pînă la cocsuri compacte, dure și de mare rezistență mecanică, implică o plastifiere prealabilă, în limite de temperatură oarecum caracteristice, urmată de o compacizare. Așadar două faze bine definite, dar atît una, cît și cealaltă, au loc în urma unei descompuneri pirogenetice a huilelor și concomitent cu aceste descompuneri. Deoarece alte tipuri de cărbuni fosili, de exemplu cărbunii bruni și antracitele, în condiții de tratament similare, deși suferă descompunere pirogenetică, nu plastifiază și deci reziduul nu mai are aspectul caracteristic al cocsului de huile, deducem că există, fie o diferențiere de componenți constituționali, nu numai cantitativă ci și calitativă, care împiedică, în condițiile date, formarea de cocs, fie că în prezența unei diferențieri constituționale, influența reciprocă a acestor constituenți împiedică prima fază — plastifierea — și deci nu mai poate avea loc cea de a doua fază, compacizarea, consecință a primei faze.

Încercările de stabilire a compoziției cărbunilor s-au făcut de diverși autori, între altele și prin extracție, ca una din căile care afectează minimal structura chimică a cărbunilor. S-a observat că prin îndepărtarea a ceea ce a fost extras și denumit bitumene, huilele cocsificabile pierd însușirea de plastifiere și deci nu mai dau cocs, pentru că lipsește materialul de aglutinare. Huilele sînt însă, prin definiție, materiale caracterizate prin predominanța substanțelor humice, adică a acelor substanțe care au rezultat sub influența diferiților factori, din material genetic lignocelulozic și se află într-un anumit stadiu de metamorfozare. Influența îndepărtării extractului bitumenic asupra plastifierii și formării cocsului a dus la concluzia că bitumenele alcătuiesc componentul care conferă huilelor însușirile de plastifiere și cocsificare. Desigur că bitumenele nu condiționează cocsificarea numai prin simpla lor prezență, la momentul respectiv, ci se pare că importanța primordială o are dispersiunea coloidală a bitumenelor în rețeaua micelară a cărbunelui. De aceea bitumenele readăugite unui reziduu nu pot să mai dea un cocs în totul la fel cu cel inițial. De altfel, în cercetările noastre asupra unor probe de huile de gaz — Lupeni — și care dă un cocs spongios, îndepărtarea extractului bitumenic obținut cu benzen sub presiune, a dus la un reziduu, care, supus cocsificării, dă un cocs mai compact, în loc să-și piardă însușirile de cocsificare, cum vom arăta într-o lucrare ulterioară. Comparat cu o huilă de cocs — Anina — care, după extracția bitumenului, în aceleași condiții, pierde însușirea de cocsificare, cantitatea de extras din Lupeni era totuși mult mai mare.

Cocsurile de petrol, rezultate din procesele de cracare de înaltă presiune, se pot caracteriza prin cantitatea redusă de materii volatile ca o consecință a unor polimerizări foarte accentuate, pînă la carboide; cele de joasă presiune au procente mai mari de materii volatile; *cauza primordială a acestor materii volatile o constituie reziduul bituminos mai mult sau mai puțin asfaltizat*, alcătuind, cu particulele de carbon, un complex coloidal.

S-au identificat în cocsurile de petrol, hidrocarburi ca picene $C_{22}H_{24}$, crachene $C_{24}H_{18}$, antracene $C_{14}H_{10}$, fenantrene $C_{14}H_{10}$, chrisene $C_{18}H_{22}$ etc., ca o consecință a reacțiilor de ordinul II, adică polimerizări ale hidrocarburilor aromatice sau hidrogenarea parțială și urmată de condensarea radicalilor ciclici formați, precum și copolimerizări, condensarea radicalilor ciclici și arilici formați după dehidrogenarea parțială. Conțin însă și rășini și asfaltene formate din nuclee aromatice, intens condensate, adică rezultate din reacții paralele de copolimerizare cu oxigen, cu sulf și cu azot.

*Compoziția elementară a cocsurilor de petrol în raport cu procentajul de materii volatile, ne poate servi ca indicator al gradului de carboidificare a reziduului solid de la cracking*, întrucît carboidificarea mai mult sau mai puțin accentuată se stabilește ușor prin degajarea unei cantități mai mici sau mai mari de materii volatile, la proba de cocsificare.

Comparînd cu huilele se observă că, cocsurile de petrol, care au materii volatile între circa 13 și 18% dau, la repirogenare, cele mai compacte reziduuri.

Procentul de materii volatile din huile se datorește atît bitumenului preexistent, cunoscut sub denumirea de bitumen A, aflat în cantități deosebit de mici, cît și descompunerii complexului humic care, din punct de vedere petrografic este reprezentat prin diverși componenți, în care componentul format din spori contribuie cu procentele cele mai mari. Ca valoare absolută, vitrita fiind predominantă, ea este și sursa cea mai importantă de materii volatile. Evident că bitumenul care apare în perioada de plastifiere suferă o descompunere și participă la formarea materiilor volatile. În cocsurile de petrol materiile volatile se formează, în măsură corespunzătoare, din eventualele resturi de hidrocarburi, dar în cea mai mare parte din substanțele bituminoase — asfalto-rășinoase — și eventual din descompunerea carboidelor, descompunere puțin probabilă sau în orice caz foarte redusă, dat fiind că reziduul de la recocsificarea lor mai are ceva hidrogen.

Așadar, la cocsurile de petrol, o contribuție importantă în formarea materiilor volatile o au componenții polimeri și copolimeri, material preexistent în aceste cocsuri și aflat într-o dispersie deosebit de fină în masa carboidică. Componenții aceștia pot fi asemuiți cu bitumenul B din huile, întrucît au același rol în cocsificarea ulterioară a acelor cocsuri de petrol care dau reziduuri cocsificate, adică plastifiază masa și provoacă formarea cocsului; ei nu pot fi extrași prin simplă solvire în benzen, ci numai dacă folosim presiune și temperatură ridicată, ca și la extracția bitumenului B din huile.

Alegerea solventului, la studiul huilelor prin extracție, diferă după scopul urmărit. Numărul solvenților utilizabili este foarte mare, dar, după modul lor de acțiune, se pot considera două grupe: a piridinei și a benzenului, fiecare din acești solvenți fiind tipul reprezentativ pentru o clasă întreagă de solvenți. Pentru a extrage pe cît posibil componenți cît mai puțin alterați și a afecta minimum posibil masa cărbunoasă, s-au studiat, la huile, comportarea așa-zișilor solvenți chimic inerți, benzen, cloroform etc. și la temperaturi mici și presiune ordinară. S-a constatat că, în acest caz, cantitatea de extras este foarte mică. Utilizarea benzenului ca solvent,

la temperaturi apropiate de punctele sale critice, dă randamente mai mari. Un principiu general al cocsificării nu se cunoaşte încă, cocsificarea este însă determinată de procese pirogenetice, cum ar fi acela de descompunere a bitumenelor. Acest fapt se observă foarte bine în modul de comportare al cocsurilor de petrol cu conţinut de materii volatile mai ridicat.

### Extracţii cu benzen la rece

Cocsul de petrol antrenează, în procesul său de formare, substanţe asemănătoare bitumenelor, depuse superficial pe cocsul de petrol, dar neintegrate coloidal. Aceste substanţe pot fi uşor îndepărtate prin simplă spălare, cu benzen, la rece. Cantitatea de bitumene reţinută superficial, este mai mare la cocsurile foarte bogate în materii volatile, în care reziduul carboidic este în cantitate mică.

Astfel, dintr-un cocs de petrol cu circa 63% materii volatile, prin spălare cu benzen, la rece, s-a redus procentul de materii volatile la circa 31%. Interesant că această spălare, aplicată unor probe de cocs de petrol, cu materii volatile reduse, nu a afectat însuşirile lor de cocsificare, deşi în unele cocsuri, anume acelea din probele 7 şi 8, s-au extras pînă la circa 3,7%; dimpotrivă, la proba 10, care a ajuns de la 63 la 31%, materii volatile, butonul de cocs, care la proba iniţială era foarte umflat, umplea creuzetul ca şi în probele Conradson; după spălare cu benzen, la rece, pentru îndepărtarea bitumenului, acest cocs de petrol prezintă, la cocsificare, un buton mult mai puţin umflat, cu început de compacizare, ceea ce denotă că bitumenele reţinute superficial influenţează şi ele procesul de plastifiere şi că deci umflarea cocsului se datoreşte şi acestui componente deşi în mică măsură.

### Extracţii cu benzen la fierbere şi presiune ordinară, în Soxhlet

Neglijînd influenţa factorului granulaţie, materialul supus extracţiei a fost măcinat sub 5 mm şi s-a ales sortul 0,5—5 mm. Randamentul în bitumene extrase este foarte asemenea aceluia de la extracţia la rece. Comportarea reziduului, la recocsificare, seamănă cu aceea observată la reziduurile de la extragerea cu benzen la rece.

Desprindem, de aici, concluzia că, în afara cocsurilor cu multe materii volatile, celelalte au bitumenele bine fixate în complexul coloid, deci nu pot fi îndepărtate numai prin simplă spălare cu solvent.

### Extracţii cu benzen sub presiune

S-a lucrat cu acelaşi sort granulometric în autoclavă de un litru capacitate, în mişcare. S-au supus extracţiei 200 g material cu circa 500cm³ benzen şi s-a obţinut uşor circa 52—58 at. şi 270—280°C; au fost, necesare circa două ore pentru a se atinge presiunea de regim după care la această presiune, s-a mai ţinut timp de circa o oră. Extracţiile s-au repetat de cîteva ori cu benzen proaspăt în aceleaşi condiţii, dar, după fiecare extracţie, reziduul era în prealabil spălat cu benzen rece. S-au

repetat extracțiile pînă la atingerea unui randament al extracției de circa 0,1—0,2%, după care s-a considerat extracția epuizată și anume, după a 5-a extracție. Rezistența butonilor de cocs scade cu avansarea extracției și chiar înainte de epuizarea finală a extracției ; butonul de cocs din cocsurile de petrol, care neextrase, dădeau cocsuri compacte, rămîne neaglutinat, prăfos.

Procentele de bitumen extrase variază, după cum se vede în tabloul nr. 3.

*Tabloul nr. 3*

**Extracție cu benzen sub presiune, pînă la epuizare**

| Nr. crt. al probei | Materii volatile (inițial) % | Bitumen după prima extracție % | Numărul total al extracțiilor | Total bitumen extras % | Aspectul butonului de cocs | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Materialul inițial | După prima extracție | După ultima extracție |
| 5 | 14,33 | 5,83 | 5 | 7,51 | Compact | Sfărîmicios | Sfărîmicios, rezistență foarte mică |
| 6 | 18,50 | 7,75 | 5 | 10,65 | Compact puțin spongios | Idem | Idem |
| 8 | 26,83 | 8,43 | 5 | 11,34 | Topit, spongios | Idem început de aglutinare | Idem |
| 10 | 63,10 | 34,11 | 5 | 39,62 | Început de aglutinare fără rezistență, umflat | Umflat început de aglutinare | Praf, aglomerat |

Tabloul nr. 4 indică cantitatea de bitumen obținut la extragere cu benzen, sub presiune, în raport cu numărul succesiv de operații de extracții.

*Tabloul nr. 4*

**Randament de extracție pentru fiecare extracție succesivă, cu benzen, sub presiune**

| Nr. crt. al probei | Materii volatile % | Randament în bitumen | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | extracția I % | extracția II % | extracția III % | extracția IV % | extracția V % | extras total % |
| 5 | 14,33 | 5,23 | 1,00 | 0,86 | 0,25 | 0,17 | 7,51 |
| 6 | 18,50 | 7,75 | 1,32 | 0,66 | 0,80 | 0,12 | 10,65 |
| 8 | 26,83 | 8,43 | 1,44 | 0,83 | 0,40 | 0,24 | 11,34 |
| 10 | 63,10 | 34,11 | 3,57 | 1,08 | 0,77 | 0,09 | 39,62 |

Randamentul în extras este mai mare în prima extracție, apoi devine din ce în ce mai redus.

Extracția sub presiune, ca și în cazul huilelor, duce la un reziduu care, la recocsificare, prezintă butoni de cocs slăbiți. Fiecare extracție, în parte, slăbește butonul de cocs, în raport cu particularitățile inițiale de cocsificare, respectiv cu procentul de materii volatile. Considerînd că bitumenele, care conferă însușirea de cocsificare, sînt extrase succesiv, extragerea lor are ca efect o diminuare succesivă a capacității de aglutinare.

### Compoziția bitumenelor extrase

Bitumenul obținut din tratamentul cu benzen în Soxhlet, din diferitele probe de cocs de petrol, se poate împărți în trei categorii :

*a*) din cocsurile de petrol seci, adică din acelea cu pînă la 6% materii volatile ; extrasele sînt de culoare deschisă, cafenie-gălbuie, solide și uneori lipicioase ;

*b*) din cocsurile de petrol cu procente de materii volatile pînă la circa 22% ; extrasele sînt de culoare cafenie și lucioase, semisolide sau solide ;

*c*) din cocsurile de petrol cu procente de materii volatile mai mari sau foarte mari, extrasele sînt aproape lichide, vîscoase, de culoare neagră.

La extracția cu benzen sub presiune, toate extrasele sînt negre poate cu o nuanță mai cafenie la cocsurile de petrol, avînd inițial materii volatile mai reduse ; extrasele sînt solide, ușor fluidizabile, dar vîscoase și lipicioase pentru acelea provenite din materialele cu procente ridicate de materii volatile.

Analiza elementară a bitumenelor extrase sub presiune, ca atare, nu acuză diferențieri prea mari, cum se vede în tabloul nr. 5.

*Tabloul nr. 5*

**Compoziția elementară a extractului bitumenic de la extracția cu benzen, sub presiune**

| Extrasul bitumenic | C % | H % | S % | O + N % (prin diferență) | Ratia atomică C/H |
|---|---|---|---|---|---|
| Din proba 5 | 86,76 | 10,03 | 0,55 | 2,66 | 0,72 |
| „ „ 6 | 87,16 | 9,25 | 0,34 | 3,25 | 0,78 |
| „ „ 8 | 84,18 | 10,84 | 0,78 | 4,20 | 0,66 |
| „ „ 10 | 85,94 | 11,37 | 0,64 | 2,05 | 0,63 |

### Extracții cu alți solvenți

În lucrarea noastră menționată, am făcut cîteva încercări de extracție cu alți cîțiva solvenți.

Este de reținut că, după extracția cu benzen sub presiune, ca și cu piridina la punctul său de fierbere, reziduul, deși în majoritatea cazurilor pierde însușirile de cocsificare, mai dă procente destul de mari de materii volatile.

Randamentul în extrasul cu piridină este mult mai mare, comparat cu cel obținut cu benzen sub presiune, totuși, nu la nivelul diferențierii constatate la cărbunii fosili. Astfel, proba 5, care la extragere cu benzen

sub presiune a dat 7,51% bitumen, la extragere cu piridină cantitatea de extras a ajuns la 11,43%, deci, deşi mai mare, nu este depăşită decît cu circa 50%, în timp ce, în majoritatea cazurilor, la cărbunii fosili, depăşirea este un multiplu şi anume de 3 sau 4 ori şi chiar mai mult, în extracţia cu piridină faţă de extracţia cu benzen sub presiune.

Butonii de cocs din reziduurile după extracţii cu piridină, în toate cazurile, sînt neaglutinaţi.

## CONCLUZII

1) Între cărbunii fosili — huile şi antraciţi — deoparte şi cocsurile de petrol rezultate de la crackingul păcurilor, de altă parte, există unele elemente comune atît în ceea ce priveşte constituţia lor, cît şi sub raportul unor însuşiri reologice, deşi genetic sînt materiale cu totul diferite.

*a*) Astfel, unele categorii de cocsuri de petrol, ca şi unele huile supuse unui tratament pirogenetic se înmoaie, trec printr-un stadiu de plastifiere, apoi lasă un reziduu compact dur.

*b*) Calităţile fizico-mecanice ale acestor reziduuri pot fi deduse, în oarecare măsură, atît la cocsurile de petrol ca şi la huile, din procentajul de materii volatile, procentaj care reprezintă pentru huile gradul de metamorfozare, pentru cocsurile de petrol gradul de cracare.

*c*) Din punct de vedere cristalografic, studiile moderne efectuate cu ajutorul razelor X, au arătat diferite structuri ale cocsului de petrol cu interferenţe similare grafitului. Cu ajutorul difracţiei de raze catodice şi al microscopului electronic, s-a dovedit prezenţa unor cristale de grafit, formînd un schelet înconjurat de compuşi organici, cu greutate moleculară mare.

Unii cercetători consideră cocsurile de petrol ca fiind sisteme disperse, formate din cristale foarte mici înecate într-o masă amorfă de compuşi aromatici foarte condensaţi. Cristalele, pe măsură ce cracajul avansează, se dezvoltă în detrimentul masei amorfe, căreia i se reduce, succesiv, din materiile volatile şi-şi schimbă treptat caracterul. În consecinţă, diversele tipuri de cocsuri de petrol, pe care noi le-am caracterizat prin diferenţa în procente de materii volatile, pot fi considerate ca aparţinînd unei serii continue de sisteme disperse, între asfalt şi grafit, fiecare etapă, faţă de precedenta, fiind mai bogată în cristalite şi rezultată din cracajul progresiv al compuşilor secundari şi terţiari de reacţie.

Cercetările röntgenografice aplicate huilelor au arătat că în cărbuni se găsesc de asemenea cristalite rigide alături de aşa-numitele cristalite mobile. În reprezentarea structurală a lui Reily [5], [6], cristalitele rigide sînt constituite din straturi grafitice paralele, iar cele mobile conţin diferite grupe laterale. Acestea din urmă, în procesul de formare a cărbunilor, pierd, succesiv, din grupele laterale, în raport cu stadiul de metamorfozare, transformîndu-se astfel în cristalite rigide şi mărind astfel, pentru fiecare etapă ulterioară, numărul cristalitelor rigide. Aşadar, există o tendinţă, ca în etapa finală de metamorfozare a cărbunilor fosili să apară un sistem alcătuit totalmente din cristalite rigide, adică numai din straturi

grafitice paralele, tendință pe care o găsim și la cocsurile de petrol, cu avansarea gradului de cracaj. De altfel, dacă se supun huilele unor operații pirogenetice brutale, cum ar fi cocsificarea lor, procesul se desfășoară în același sens, pe contul grupelor laterale mobile, și trec astfel din cristalite mobile în cristalite rigide [5], [6].

Structura cristalografică a bitumenelor extrase cu piridină, din huile, este foarte asemănătoare aceleia găsite pentru substanțele humice [5], [6], după cum se pare că se dovedește și pe cale chimică, deci cu predominanța nucleelor aromatice [7].

*d*) Bitumenele derivate ca reziduu la distilarea țițeiurilor, adică tocmai materialul din care, prin cracare, derivă cocsurile de petrol, prezintă o valoare pentru rația C/H foarte mare și mai ales, cu atît mai ridicată, cu cît materialul a suferit un cracaj mai avansat; ele se caracterizează deci prin predominanța nucleelor aromatice [8]. Röntgenogramele corespunzătoare duc la concluzii similare, adică a unor reprezentări corespunzătoare unor nuclee aromatice [8].

Cercetările efectuate asupra structurii chimice a cărbunilor fosili, prin metode chimice, au stabilit caracterul aromatic policiclic al cărbunilor, ceea ce se confirmă și prin cercetările cu metodele de spectroscopie infraroșie [9].

V e s e l o v s k i [10], [11] presupune că chiar în perioadele inițiale de formare a cărbunilor încep să apară combinații aromatice policiclice, alcătuind uriașe molecule — stratificate într-o rețea grafitică — pe marginile căruia se află grupe legate chimic și în care se găsesc pe lîngă carbon și alți atomi.

S-au făcut diverse reprezentări privitor la numărul de nuclee. După unii cercetători numărul lor variază între 14 pentru 80% carbon și 20 pentru 89% carbon. J. B. N e l s o n [12], care urmărește în vitrita unor huile diferite, cuprinzînd de la 77 la 89% carbon, distribuția statistică a atomilor învecinați ai unui atom dat, folosind analizele integratelor Fourier și evitînd astfel prezumțiile privind natura moleculară sau cristalinitatea substanței cercetate, conchide că pot exista și grupe de 4 nuclee, dacă din carbonul total, 75% s-ar afla în nucleele aromatice.

În reprezentarea lui L. L. N e s t e r e n k o [10], huilele sînt considerate drept amestecuri complexe a diferite substanțe macromoleculare, în care grupa vitritei are proprietățile coloizilor liofili și ar fi alcătuită din unități structurale identice în compoziție.

*e*) Condensatele derivate din materiile volatile degajate la recocsificarea cocsurilor de petrol sînt alcătuite în special din hidrocarburi aromatice policiclice ca și gudroanele din huile; cocsurile de petrol sînt, cum s-a arătat, tocmai consecința unor polimerizări cu dehidrogenări parțiale ale hidrocarburilor aromatice, deci pot fi considerate ca fiind tocmai reprezentantul tipic al unor hidrocarburi aromatice polinucleare.

*f*) Considerînd cele de mai sus, rezultă că există unele similitudini importante între cocsurile de petrol și huile, mai ales în stadii mai avansate de metamorfozare a huilelor. Dacă ținem seama că dintre constituenții petrografici ai huilelor, constituentul vitritic este cel mai bogat în oxigen și în același timp alcătuiește, în majoritatea cazurilor, componentul predo-

minant, urmează că se poate considera că $CO_2$ și CO din compoziția gazelor, de la piroliza huilelor, se datorește vitritei. Cărbunii din stadiile de încarbonizare naturală, mai avansate, degajînd la pirogenare, în raport cu gradul de metamorfozare, din ce în ce mai puțin CO și $CO_2$, pot fi considerate ca reprezentînd în raport cu gradul de încarbonizare, o îmbogățire mai accentuată în cristalite rigide, pe măsură ce cristalitele mobile pierd CO și $CO_2$, adică sărăcesc în oxigen. Această sărăcire a fost dovedită experimental de Kirkby, Lakey și Sarjant [9], din lucrările cărora reiese că, în cărbunii mai metamorfozați, se evidențiază o structură mai condensată, din care scade conținutul în catene laterale alifatice ca și acelea de CO.

*g*) Apele pirogenetice rezultate la recocsificarea cocsurilor de petrol sînt ape amoniacale ca și acelea de la cocsificarea huilelor [1].

*h*) Cercetarea mai adîncă a constituției cocsurilor de petrol și a modului cum se desfășoară formarea lor în procesul de cracaj, este de natură a aduce elemente importante în lămurirea constituției cărbunilor fosili și a schimbărilor structurale ce se produc în diferitele stadii de metamorfozare, atît în legătură cu carbonul, hidrogenul și oxigenul constituțional cît și în ceea ce privește compușii cu azot.

*Institutul politehnic, București,*
*Facultatea de chimie industrială*

## ХАРАКТЕРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРОЦЕССА КОКСОВАНИЯ УГЛЯ

СООБЩЕНИЕ

## О БИТУМЕ, ПОЛУЧАЕМОМ ИЗ КОКСУЮЩЕГОСЯ УГЛЯ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Исследуется поведение при коксовании в условиях, одинаковых с условиями коксования каменного угля, нефтяных коксов, происшедших от крекирования, а также причины образования из этих некоксованных нефтяных коксов компактного и твердого кокса. Проводится аналогия между пирогенетическими свойствами этих коксов и коксующегося каменного угля и исследуются особенности битуминозных веществ, извлекаемых растворителями из нефтяных коксов с различным процентным содержанием летучих веществ.

Следует заключение, что нефтяные коксы, как и каменный уголь, состоят из поликонденсированных ароматических ядер.

### ОБЪЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1. — Темп снижения кривой пластицирования газового каменного угля (I), коксового каменного угля (II) и нефтяного кокса (III).

Рис. 2. — Изменение в темпе снижения кривой пластицирования газового каменного угля (Урикани) в соответствии с процентом пустого содержимого.

Рис. 3. — Темп снижения кривой пластицирования газового каменного угля (Лупени) в соответствии с процентом пустого содержимого.

Рис. 4. — Темп снижения кривой пластицирования газового каменного угля (Урикани) в соответствии с различными гранулометрическими сортами, отделенными после промывки.

# ÉLÉMENTS CARACTÉRISTIQUES DANS LE PROCESSUS DE COKÉFACTION DE LA HOUILLE

## NOTE I

## DU BITUME CONTENU DANS LES HOUILLES COKÉFIABLES

(RÉSUMÉ)

On étudie — dans les mêmes conditions que pour la cokéfaction des houilles — le comportement à la cokéfaction des cokes de pétrole résultant du cracking et les causes qui conduisent à la formation d'un coke compact et dur à partir de ces cokes de pétrole non cokéfiés. On étudie l'analogie de leur comportement pyrogénétique avec celui des houilles cokéfiables ainsi que les particularités des substances bitumineuses extraites, à l'aide de solvants, des cokes de pétrole à teneurs diverses de matières volatiles.

On en déduit que, de même que les cokes de houille, les cokes de pétrole sont constitués par des noyaux aromatiques polycondensés.

### EXPLICATION DES FIGURES

Fig. 1. — Allure de chute de la courbe de plastification pour : I) houille de gaz, II) houille de coke et III) coke de pétrole.

Fig. 2. — Variations dans l'allure de chute de la courbe de plastification d'une houille de gaz — Uricani — en raison de la teneur en stérile, exprimée en %

Fig. 3. — Allure de chute de la courbe de plastification d'une houille de gaz — Lupeni — en raison de la teneur en stérile, exprimée en %.

Fig. 4. — Allure de chute de la courbe de plastification d'une houille de gaz — Uricani — en raison des différentes catégories granulométriques, séparés aprés lavage.

### BIBLIOGRAFIE

1. I. Blum şi P. Popescu, *Studiul cocsurilor de petrol.* Monit. Petr. Roum., 1943.
2. A. Fischer, Journ. Inst.Fuel, 1935; W. F. Jr. Stroud, *The Science of Petroleum IV.* Oxford University Press, 1938.
3. Lebeau, Compte-Rendus, 1923, nr. 177; 1924, nr. 178.
4. I. Blum, Soc. Roum. Sci. Bull. Ch. pure et appliquée, 1927 t. XXX.
5. . . *Proc. Conf. on the Ultrafine Structure of Coals and Cokes.* Londra, 1944.
6. M. Th. Mackowsky, Brennstoff Chemie, 1949, nr. 30.
7. D. J. W. Kreulen, Fuel, Londra 1946, nr. 25.
8. I. Ph. Pfeiffer, *The Proprieties of Asphaltic Bitumen.* Elsevier Publishing Comp. Inc. N—J, Amsterdam, Londra, Brussels, 1950.
9. W. A. Kirkby, I. R. Lakey, a. R. J. Sarjant, Fuel, Londra, 1954, t. XXXIII.
10. L.L. Nesterenko, *Trudî pervogo vsesoioznogo soveşania,* 1950, *g.* Izd. Akad. Nauk SSSR, Moscova, 1953.
11. B. C. Veselovski, *Uglerod, almază, grafită i ugoli i metodologia ih isledovania,* 1936.
12. J. B. Nelson, Fuel, Londra, 1954, t. XXXIII.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 4, 1956



# DOMENIUL DE REVERSIBILITATE AL MAŞINILOR TERMICE

## APLICAŢIILE ACESTEI NOŢIUNI LA STUDIUL MOTOARELOR CU ARDERE INTERNĂ *)

DE

E. GAIGINSCHI

Prof. Ştefan Procopiu a introdus în 1948, în termodinamică, o noţiune nouă : „domeniul de reversibilitate a maşinilor termice" ; această noţiune este explicată în lucrarea sa „Termodinamica" **).

În cele ce urmează ne propunem să folosim această noţiune în *teoria motoarelor cu ardere internă.*

★

Pentru înţelegerea acestei noţiuni, reproducem din lucrarea menţionată, următorul text :

„În transformarea căldurii în lucru mecanic — prin maşina cu vapori — trebuie să considerăm două porţiuni de căldură : o porţiune de căldură este transportată la izvorul rece, în acord cu legea naturii, exprimată prin formula Carnot ; această parte de căldură este complet ireversibilă. O a doua parte, diferenţa dintre cantitatea de căldură de la izvorul cald şi cea cedată la izvorul rece, este considerată perfect reversibilă şi capabilă de a se preface total în lucru mecanic. Această a doua parte a căldurii constituie domeniul de reversibilitate a maşinii termice şi se întinde între temperaturile $T_1$ şi $T_2$. În acest domeniu restrîns, atît Carnot, cît şi Clausius, consideră că transformarea căldurii în lucru mecanic se face reversibil".

„În funcţionarea maşinii termice (Carnot), domeniul de reversibilitate se întinde între $T_1$ şi $T_2$ cu o cantitate de căldură $\Delta Q = Q_1 - Q_2$, care

*) Lucrare prezentată Institutului de energetică la data de 25 ianuarie 1956.
**) § 131, p. 182—185.

este considerată reversibilă. Prin considerarea acestui domeniu de reversibilitate, *se elimină valoarea absolută a căldurii și se face să intervină numai variația* $\Delta Q$, *adică valoarea relativă a diferenței de căldură dintre izvorul cald și izvorul rece, variație care este reversibilă*".

„Mașina termică (Carnot) lucrează în domeniul de reversibilitate, dintre $T_1$ și $T_2$, cu cantitatea de căldură $Q_1 - Q_2$ care este reversibilă și se poate transforma total în lucru mecanic, după relația :"

$$\frac{L}{EQ} = \frac{L}{E(Q_1 - Q_2)} = 1.$$

În încheierea aceluiași paragraf (131), prof. Șt. Procopiu scoate în evidență că mașinile termice (mașina cu vapori, motorul cu gaz etc.) au diferite domenii de reversibilitate.

Din textul citat se desprind următoarele idei esențiale :

1) Domeniul de reversibilitate a mașinii Carnot, care se întinde între $T_1$ și $T_2$ cu o cantitate de căldură $\Delta Q = Q_1 - Q_2$ se reprezintă în diagrama $T-S$, din figura 1, *a*), prin aria *1—3—4—2—1*.

2) În cadrul acestui domeniu, căldura reversibilă $\Delta Q = Q_1 - Q_2$ se preface total în lucru mecanic, așa încît randamentul transformării căldurii în lucru mecanic, în înțelesul principiului echivalenței, este 1.

3) Mașinile termice existente, au diferite domenii de reversibilitate.

Interpretarea acestor idei conduce la proprietățile domeniilor de reversibilitate a mașinilor termice. Într-adevăr :

*a*) Prin analogie cu domeniul de reversibilitate Carnot (fig. 1, *a*)) în care introducerea și cedarea căldurii se efectuează sub temperaturi

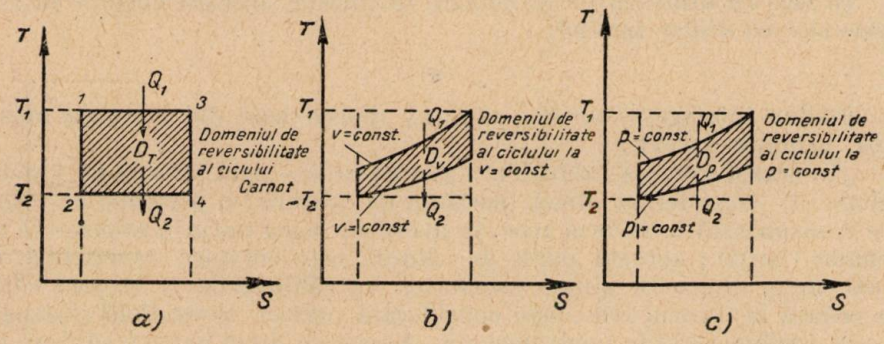



Fig. 1

constante, putem considera și alte domenii, de pildă, domeniile de reversibilitate ale unor motoare existente, în care introducerile și cedările de căldură se efectuează sub *volum constant* (fig. 1, *b*)), sau sub *presiune constantă* (fig. 1, *c*)).

Toate aceste trei tipuri de domenii, sub temperatură constantă ($D_T$), sub volum constant ($D_v$) și sub presiune constantă ($D_p$), au drept caracteristică comună faptul că atît introducerea, cît și cedarea căldurii se

efectuează sub același fel de transformări : fie sub $T$ = const., fie sub $v$ = const. sau sub $p$ = const. Să le numim : *domeniul izoterm* ($D_T$), *domeniul izochor* ($D_v$) și *domeniul izobar* ($D_p$). Ele constituie *domeniile fundamentale* ale motoarelor cu ardere internă, iar succesiunea proceselor care au loc în funcționarea motoarelor respective, alcătuiesc ciclurile fundamentale ale acestora.

După cum se vede din figura 1, *a*), *b*), *c*), domeniile fundamentale au o singură introducere și o singură cedare de căldură ; ele sînt limitate lateral de două izentropice, iar în profunzime sînt limitate de izoterme, izochore și izobare.

Dacă am considera că cele trei mașini teoretice (ale căror domenii de reversibilitate sînt reprezentate în figura 1, *a*), *b*), *c*)) ar funcționa *între aceleași limite de temperaturi și între aceleași izentropice*, așa cum se vede în figura 2, se observă imediat că domeniile fundamentale diferă între ele, în primul rînd prin *forma lor* ; aceste deosebiri între formele diferite ale domeniilor fundamentale se datoresc celor trei feluri sub care se poate introduce și ceda căldura din cicluri.

*b*) Din figura 2 se observă, de asemenea, că între aceleași limite de temperaturi și între aceleași izentropice, domeniile fundamentale diferă între ele și prin *mărimea* lor, adică :

$$D_T > D_p > D_v .$$

Aceasta înseamnă că în *condițiile menționate* și în raport cu tipul motorului considerat, cantitatea de căldură reversibilă care se preface total în lucru mecanic (în sensul principiului echivalenței) are mărimi diferite, adică ea reprezintă fracțiuni diferite din cantitățile de căldură $Q_i$ introduse în aceste motoare, adică randamentele termice ale motoarelor considerate sînt diferite.

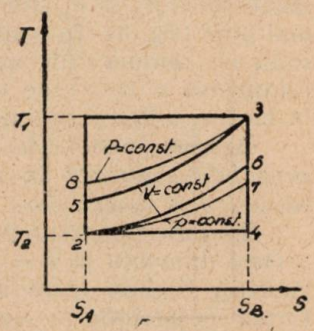


Fig. 2

Astfel, în cazul motorului izoterm (Carnot), între limitele de temperatură $T_1$ și $T_2$ și între izentropicele $S_A$ și $S_B$, cantitatea de căldură introdusă în motor $Q_1$ (în care se cuprinde căldura reversibilă și ireversibilă) este reprezentată de aria $S_A—1—3—S_B$, așa cum se vede în figura 2. Or, în comparație cu celelalte două motoare și după cum se poate ușor constata din figură, căldura reversibilă $D_T$, care se preface total în lucru mecanic, reprezintă fracțiunea cea mai mare din $Q_1$.

În aceleași condiții, pentru motorul izobar care funcționează după ciclul la $p$ = const., căldura reversibilă $D_p$ = aria $2—8—3—7—2 < D_T$ reprezintă o fracțiune mai mică din căldura $Q_1$, introdusă în acest motor, decît în cazul precedent.

Pentru motorul izochor, căldura reversibilă $D_v$ = aria $2—5—3—6—2 < D_p < D_T$, reprezintă o fracțiune și mai mică din căldura $Q_1$ introdusă în acest motor, decît în celelalte cazuri.

Aşadar, în aceleaşi limite de temperaturi şi între aceleaşi izentropice, *mărimea domeniilor* este o altă caracteristică a acestora şi anume o caracteristică de ordin calitativ.

*c*) Trebuie observat însă, că nu numai mărimea este o caracteristică calitativă a domeniilor; zona de temperaturi, în care se preface căldura reversibilă în lucru mecanic, adică *poziţia domeniilor* constituie o altă caracteristică calitativă a acestora.

Să considerăm, de pildă, că o cantitate constantă de căldură reversibilă (adică un domeniu de suprafaţă constantă $D_T$) alunecă pe cele două

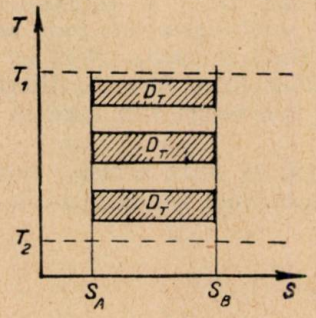



Fig. 3

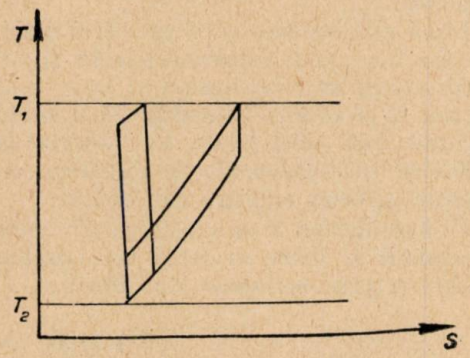



Fig. 4

izentropice $S_A$ şi $S_B$ din zona temperaturilor înalte în zona temperaturilor mai mici (fig. 3). În acest caz, se observă uşor că, cu cît ne deplasăm spre zona cu temperaturi mai mici, aceeaşi cantitate de căldură reversibilă reprezintă o fracţiune din ce în ce mai mare din căldura $Q_1$ introdusă în motor, adică randamentul termic al maşinii este în creştere.

Aşadar, între aceleaşi izentropice, *poziţia pe care o are un domeniu de suprafaţă constantă în zona temperaturilor, constituie o altă caracteristică calitativă a domeniilor.*

Trebuie remarcat de asemenea că, cu excepţia domeniului Carnot, un acelaşi domeniu la $v$ = const., sau la $p$ = const. (fiecare de mărime constantă), limitat între aceleaşi temperaturi extreme, îşi poate schimba forma (păstrîndu-şi constantă suprafaţa), atunci cînd entropia creşte (fig. 4). Această schimbare a formei, provocată de creşterea de entropie, antrenează scăderea randamentului termic şi pune în evidenţă că pentru aceeaşi mărime a domeniilor, alunecarea laterală a vîrfului superior al domeniului, face ca toată cantitatea de căldură reversibilă să reprezinte fracţiuni tot mai mici din căldura $Q_1$ introdusă în motor. Aşadar, acelaşi domeniu de mărime constantă poate aluneca pe izentropice sau pe izoterme.

Alunecarea domeniilor pe izentropice, din zona temperaturilor înalte spre zona temperaturilor mai mici, măreşte randamentul termic; alunecarea pe izoterme (ca în fig. 4), în sensul creşterii entropiei (cu excepţia domeniului Carnot), micşorează randamentul termic.

*d*) În sfîrșit, trebuie observat că între aceleași limite de temperaturi și între aceleași izentropice, *domeniile fundamentale sînt perfect determinate*, așa încît se pot stabili între ele diferite relații.

Din toate acestea putem conchide că proprietățile de bază ale domeniilor de reversibilitate sînt următoarele :

1) forma ;
2) mărimea ;
3) poziția și
4) randamentul unitar al transformării căldurii reversibile în lucru mecanic, în sensul principiului echivalenței.

Primele trei proprietăți sînt calitative ; a patra este cantitativă.

Toate aceste proprietăți sînt strîns legate între ele.

Să aplicăm proprietățile domeniilor reversibile, în teoria motoarelor cu ardere internă.

## 1° APLICAȚIA PROPRIETĂȚILOR, FORMA ȘI MĂRIMEA DOMENIILOR, PENTRU SPORIREA CALITĂȚII MAȘINILOR TERMICE

Din cele de mai sus rezultă că între aceleași limite de temperaturi și între aceleași izentrope, din cantitățile de căldură $Q_1$ (diferite între ele), absorbite de cele trei tipuri de motoare termice, cantitatea cea mai mare de căldură reversibilă provenită din $Q_1$ și al căror raport definește randamentul termic, evoluează în mașina lui Carnot.

Așadar, între aceleași limite de temperaturi și aceleași izentrope, domeniul care are cea mai mare suprafață și care poate fi luat drept etalon de comparație este domeniul izoterm ; urmează apoi, în ordinea mărimii, domeniul izobar, iar ultimul se situează domeniul izochor.

Să folosim aceste rezultate pentru studiul calității motoarelor.

După cum se știe, calitatea motoarelor poate fi apreciată prin doi indici calitativi și anume :

— *randamentul termic*, a cărui expresie scrisă în funcție de mărimea domeniului este :

$$\eta_t = \frac{D}{Q_1},$$

în care :

$D$ este mărimea domeniului considerat, iar

$Q_1$, cantitatea de căldură absorbită de motorul considerat.

Trebuie observat că randamentul termic este un indice calitativ cu caracter absolut ;

— *gradul de perfecție* al motorului teoretic considerat, care este raportul dintre mărimea domeniului considerat și mărimea domeniului izoterm, luat ca etalon, adică :

$$\rho = \frac{D}{D_T}.$$

Pentru motorul izoterm el are valoarea 1 :

$$\rho = \frac{D_T}{D_T} = 1.$$

Gradul de perfecție $\rho_1$ al motorului izobar și gradul de perfecție $\rho_2$ al motorului izochor vor fi :

$$\rho_1 = \frac{D_p}{D_T} \text{ și } \rho_2 = \frac{D_v}{D_T}$$

și, deoarece $D_p > D_v$, rezultă

$$1 > \rho_1 > \rho_2.$$

Trebuie observat că gradul de perfecție al unui motor este un indice calitativ, cu caracter relativ.

În cadrul condițiilor fixate inițial (aceleași limite de temperaturi și aceleași izentrope), între cei doi indici calitativi există deci relația

$$\eta_t = \frac{D}{Q_1}; \quad \rho = \frac{D}{D_T}$$

și deoarece

$$D = \eta_t \times Q_1 = \rho \times D_T,$$

rezultă

$$\boxed{\eta_t \times Q_1 = \rho \times D_T.}$$

Așadar, dacă ținem seama de indicii de calitate menționați și de mărimea pe care o au cele trei domenii fundamentale considerate, rezultă că între aceleași limite de temperaturi și între aceleași izentrope, calitatea acestor mașini se clasifică în următoarea ordine în primul rînd *motorul izoterm*, apoi *motorul izobar* și cel din urmă este *motorul izochor*.

Toate acestea scot în evidență că, pentru cele trei tipuri reprezentative de motoare termice perfecte, și în *condițiile fixate*, cele mai calitative absorbții și cedări de căldură sînt cele *izoterme*, urmate apoi de cele *izobare*, iar cele mai scoborîte, din punct de vedere calitativ, sînt cele *izochore*.

În consecință : între aceleași limite de temperaturi și între aceleași izentropice, *forma și mărimea domeniilor* definesc calitatea motoarelor.

*Forma și mărimea domeniilor sînt două caracteristici inseparabile, dependente direct de calitatea celor trei transformări. A îmbunătăți calitatea motoarelor înseamnă a mări domeniul lor de reversibilitate, utilizînd ca metodă posibilitatea de a combina între ele cele trei feluri de a absorbi și ceda căldura.*

Să studiem în ce condiții poate fi mărit domeniul de reversibilitate al motoarelor.

După cum se vede din figura 2, între aceleași limite de temperaturi și între aceleași izentrope, cele trei domenii considerate ($D_T$, $D_p$ și $D_v$)

au mărimi perfect determinate și deci nu pot fi mărite; aceasta înseamnă că în condițiile fixate, cele trei motoare considerate (motorul izoterm. motorul izobar și motorul izochor) au calități determinate, adică randamentele lor termice sau gradele lor de perfecție nu pot fi depășite.

Dar, dacă facem abstracție de tipul motoarelor și ne referim numai la posibilitatea de a mări suprafața domeniilor $D_v$ și $D_p$, constatăm din aceeași figură că, între aceleași limite de temperaturi și între aceleași izentrope, este posibil să considerăm domenii reversibile de suprafață mai

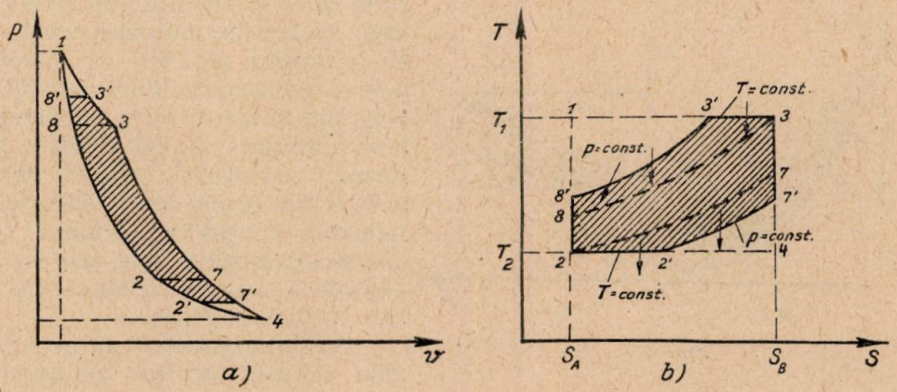



Fig. 5

mare ca a celui izochor sau a celui izobar. Această posibilitate provine din faptul că putem combina între ele transformările de calitate mai redusă cu transformările de calitate mai ridicată.

De pildă, făcînd abstracție de tipul mașinii și referindu-ne numai la domeniul izobar, constatăm că îl putem mări pe acesta din urmă, dacă combinăm transformarea izobară cu cea izotermă, așa cum se vede în figura 5, *b*). Domeniul obținut are ca mărime aria $2-8'-3'-3-7'-2'-2$ și care este mai mare ca domeniul izobar a cărui mărime este reprezentată de aria $2-8-3-7-2$ din figura 5, *b*).

Este evident că, deoarece transformarea izotermă este de cea mai bună calitate, o altă combinație în sensul creșterii indicilor calitativi nu mai este posibilă; în schimb, în cadrul acestei combinații, indicii calitativi pot fi continuu crescuți, prin creșterea continuă a izotermiei în detrimentul izobariei. La limită, dispariția izobariei conduce la motorul etalon izoterm.

Trebuie însă remarcat că domeniul obținut corespunde unui tip nou de motor, adică unui motor care ar absorbi și ceda căldura sub $p$ = const. și sub $T$ = const. În diagrama $p-v$ ciclul acestui motor este reprezentat de linia $2'-2-8'-3'-3-7'-2'$ din figura 5, *a*).

Așadar, *între aceleași limite de temperaturi și între aceleași izentrope, mărirea domeniilor de reversibilitate este condiționată de schimbarea tipului de motor, adică de crearea unui nou tip de motor.*

De asemenea, dacă facem abstracție de tipul mașinii și ne referim la domeniul izochor, constatăm că sînt două posibilități de a-l mări și anume :

1) Combinînd transformarea izochoră cu transformarea izobară, așa cum se vede în figura 6, *b*) și 6, *a*), sau

2) Combinînd transformarea izochoră cu transformarea izotermă, așa cum se vede în figura 7, *b*) și 7, *a*).

În ambele cazuri, domeniile obținute corespund unor noi tipuri de motoare ai căror indici calitativi sînt superiori indicilor calitativi ai motorului izochor. De fapt, dintre aceste două tipuri de motoare, unul din ele și anume motorul cu introducere și cedare de căldură sub volum constant și sub presiune constantă este aproape complet realizat sub forma motorului Diesel rapid, acesta din urmă deosebindu-se de motorul considerat, numai prin cedarea căldurii și care, teoretic, se consideră că se face la acesta numai sub volum constant.

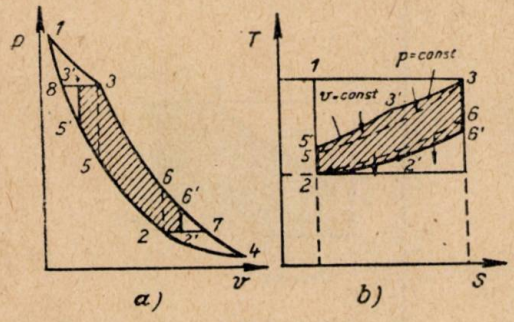



Fig. 6

Trebuie observat că în condițiile fixate, mărirea domeniului izochor și izobar (caracterizate printr-o singură introducere și cedare de căldură) se poate realiza prin combinarea cîte două a celor trei transformări și anume : $p \to T$, $v \to p$ și $v \to T$. Astfel de combinații duc la necesitatea de a crea tipuri noi de motoare, cu indici calitativi sporiți, caracterizate prin două feluri de introduceri și două feluri de cedări de căldură.

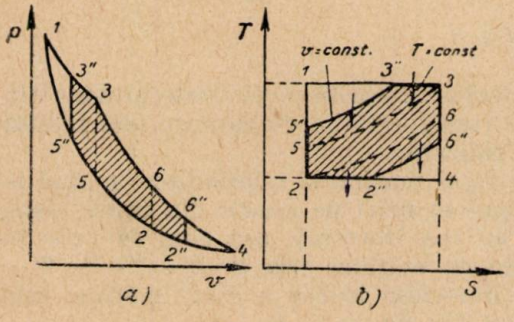



Fig. 7

Dar, în afară de aceste domenii noi, și în condițiile fixate, putem crește mărimea domeniului izochor combinînd între ele toate cele trei feluri de transformări. O astfel de combinație duce la necesitatea de a crea *un motor de tip nou*, caracterizat prin trei feluri de introduceri și de cedări de căldură. Domeniulobținut are ca mărime aria *3—4—5—6—7—8—1—2—3* din figura 8, *b*). Un astfel de domeniu, permițînd combinarea între ele a celor trei feluri de a introduce și a ceda căldura, permite studiul calitativ al tuturor tipurilor de motoare.

El reprezintă domeniul general de reversibilitate al motoarelor.

În diagrama $p—v$, ciclul unui astfel de motor este reprezentat de linia *1—2—3—4—5—6—7—8—1* din figura 8, *a*). El ar funcționa astfel : din *4* în *5*, din *5* în *6* și din *6* în *7*, introducerea căldurii se face sub $v$=const., sub $p$ = const. și sub $T$ = const. Din *7* în *8* are loc detenta adiabatică.

Din *8* în *1*, din *1* în *2* și din *2* în *3*, cedările de căldură se efectuează sub $v$ = const., sub $p$ = const. și sub $T$ = const. Din *3* în *4* are loc compresia adiabatică.

Pentru combinarea introducerilor și cedărilor de căldură, să presupunem că un astfel de motor ar poseda un mecanism pentru reglajul unei introduceri determinate de căldură și un alt mecanism pentru reglajul limitat al cedărilor de căldură (valoarea minimă a cedărilor de căldură corespunzînd procesului de compresie izotermic), cu ajutorul cărora să le poată

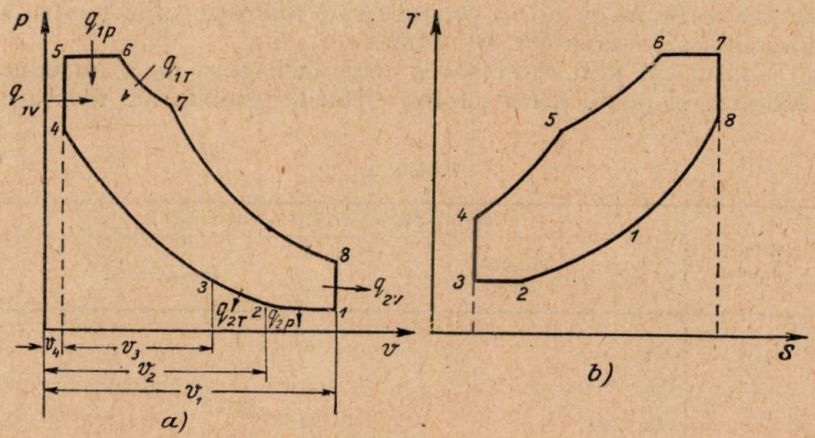



Fig. 8

micșora sau mări în așa fel, încît să fie capabilă ca prin acționarea convenabilă a acestora să poată realiza toate ciclurile posibile, care pot rezulta din combinarea între ele a introducerilor și a cedărilor de căldură.

Cum un astfel de ciclu poate genera toate ciclurile posibile, îl numim *ciclul general* sau *ciclul caracteristic* al motoarelor cu ardere internă perfectă. Studiul indicilor calitativi ai motoarelor se reduce, deci, la studiul indicilor calitativi ai ciclului general.

În *concluzie*, una din aplicațiile celor două proprietăți ale domeniilor de reversibilitate ale mașinilor termice, adică *forma și mărimea domeniilor*, constă din trasarea drumului ce trebuie urmat pentru crearea de *noi tipuri de mașini de calitate mărită*. Dintre cele două tipuri noi de mașini, ultimul tip, și anume mașina cu introducerea și cedarea căldurii sub $v$ = const., sub $p$ = const. și sub $T$ = const., pune în evidență că *drumul pe care trebuie să-l urmeze tehnica actuală pentru sporirea calitativă a mașinilor termice îl constituie studiul introducerii și cedării căldurii sub* $T$ = = *const.* În legătură cu aceasta trebuie remarcat că dacă tehnica actuală este familiarizată cu realizarea introducerii căldurii la $p$ = const. și $v$ = = const. și a pierderii de căldură sub $p$ = const., în schimb realizarea

practică a introducerii și a pierderilor de căldură sub $T = \text{const.}$, trebuie considerată într-o fază incipientă. În sfîrșit, se poate afirma că soluția calitativă a motoarelor cu ardere internă, prevăzută ca un rezultat al măririi domeniilor de reversibilitate, este confirmată în mare măsură și de evoluția lor istorică.

## 2° APLICAȚIILE CARE REZULTĂ DIN STUDIUL CICLULUI GENERAL

Existența *ciclului general* al motoarelor cu ardere internă perfectă, reprezentat în figura 8, *a*), *b*) conduce la o aplicație utilă pentru studiul termodinamic al motoarelor și anume :

$a_1$) Faptul că, prin combinarea celor trei feluri de a introduce și a ceda căldura, el poate genera toate ciclurile posibile ale motoarelor cu

*Tabloul nr. 1*

| Vîrfurile ciclului | Expresiile parametrilor din vîrfurile ciclului | |
|---|---|---|
| | Presiunile ($kg/m^2$) | Temperatura °K |
| 1 | $p_1$ | $T_1$ |
| 2 | $p_2 = p_1$ | $T_2 = \frac{T_1}{\varepsilon_1}$ |
| 3 | $p_3 = p_1\,\varepsilon_2$ | $T_3 = \frac{T_1}{\varepsilon_1}$ |
| 4 | $p_4 = p_1\,\varepsilon_2\,\varepsilon_3^k$ | $T_4 = \frac{T_1}{\varepsilon_1} \cdot \varepsilon_3^{k-1}$ |
| 5 | $p_5 = \lambda p_1\,\varepsilon_2\,\varepsilon_3^k = p_2\,\delta_2\,\delta_3^k$ | $T_5 = \lambda \cdot \frac{T_1}{\varepsilon_1} \cdot \varepsilon_3^{k-1}$ |
| 6 | $p_6 = \lambda p_1\,\varepsilon_2\,\varepsilon_3^k$ | $T_6 = \lambda \cdot \delta_1 \cdot \frac{T_1}{\varepsilon_1} \cdot \varepsilon_3^{k-1}$ |
| 7 | $p_7 = \lambda p_1 \left(\frac{\varepsilon_2}{\delta_2}\right) \cdot \varepsilon_3^k$ | $T_7 = \lambda \cdot \delta_1 \cdot \frac{T_1}{\varepsilon_1} \cdot \varepsilon_3^{k-1}$ |
| 8 | $p_8 = \lambda p_1 \left(\frac{\varepsilon_2}{\delta_2}\right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_3}{\delta_3}\right)^k$ | $T_8 = \lambda \cdot \delta_1 \cdot \frac{T_1}{\varepsilon_1} \left(\frac{\varepsilon_3}{\delta_3}\right)^{k-1}$ |

ardere internă, conduce la ideea că expresia elementelor sale de bază (parametrii din vîrfurile ciclului, randamentul termic, lucrul mecanic și presiunea medie) reprezintă expresiile generale ale elementelor menționate, oferind deci posibilitatea de a fi particularizate, pentru oricare din ciclurile pe care dorim să le studiem.

Prima aplicație a ciclului general, care a constituit subiectul unei comunicări separate *), a condus la determinarea, prin metodele obișnuite, a expresiilor generale ale elementelor de bază menționate, și anume :

1) *Expresiile generale ale parametrilor din vîrfurile ciclului, calculate în funcție de parametrii stării inițiale* ($p$, $T$) trecute în tabloul nr. 1.

În relațiile din tabloul nr. 1 și în cele ce urmează mai jos :

$p_1, p_2, \ldots, p_8, v_1, v_2, \ldots, v_8, T_1, T_2, \ldots, T_8$ reprezintă presiunile, volumele specifice și temperaturile absolute corespunzătoare cifrelor din vîrfurile ciclului general, reprezentat în figura 8 ;

$\varepsilon_1 = \frac{v_1}{v_2}$; $\varepsilon_2 = \frac{v_2}{v_3}$; $\varepsilon_3 = \frac{v_3}{v_4}$; $\varepsilon = \frac{v_1}{v_4}$, reprezintă respectiv *rapoartele volumetrice parțiale* sub care se efectuează contracția sub presiune constantă de la *1* la *2*, compresia izotermă de la *2* la *3*, compresia adiabatică de la *3* la *4*, iar $\varepsilon = \frac{v_1}{v_4} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3$ este *raportul volumetric total* al motorului, corespunzător procesului de compresie reprezentat prin linia *1—2—3—4* ;

$\delta_1 = \frac{v_6}{v_5}$; $\delta_2 = \frac{v_7}{v_6}$; $\delta_3 = \frac{v_8}{v_7}$; $\delta = \frac{v_8}{v_5}$, reprezintă respectiv *gradele parțiale de detentă* sub care se efectuează detenta sub presiune constantă de la *5* la *6*, detenta izotermă de la *6* la *7*, detenta adiabatică de la *7* la *8*, iar $\delta = \frac{v_8}{v_5} = \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \delta_3$ este *gradul total al procesului de detentă*, reprezentat prin linia *5—6—7—8* ;

$\lambda = \frac{p_5}{p_4} = \frac{p_8}{p_1} \cdot \frac{\delta_2 \delta_3^k}{\varepsilon_2 \varepsilon_3^k}$ este raportul de creștere a presiunii, ca rezultat al introducerii căldurii sub $v = \text{const.}$ ;

$k$ este exponentul adiabatic al gazului perfect ce evoluează în motor.

2) *Expresia generală a randamentului termic* dată de relația :

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda \delta_1 \left(\frac{\varepsilon_3}{\delta_3}\right)^{k-1} - \varepsilon_1 + k(\varepsilon_1 - 1) + (k-1) \ln \varepsilon_2}{[(\lambda - 1) + \lambda k (\delta_1 - 1) + \lambda (k-1) \delta_1 \ln \delta_2]} \cdot \frac{1}{\varepsilon_3^{k-1}}. \quad (1)$$

În această relație $\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$, $\varepsilon_3$, $\delta_1$, $\delta_2$, $\delta_3$, $\lambda$ și $k$ au aceeași semnificație ca mai sus.

3) *Expresia generală a lucrului mecanic produs în cursul ciclului* dată de relația

$$L = p_4 v_4 \left\{ \left[ \lambda (\delta_1 - 1) + \lambda \delta_1 \ln \delta_2 + \frac{\lambda \delta_1}{k-1} \left( 1 - \delta_2^{k-1} \cdot \frac{\delta_1^{k-1}}{\varepsilon^{k-1}} \right) \right] - \right.$$

$$\left. - \left[ \frac{1}{k-1} \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon_3^{k-1}} \right) + \frac{1}{\varepsilon_3^{k-1}} \ln \varepsilon_2 + \frac{1}{\varepsilon_3^{k-1}} (\varepsilon_1 - 1) \right] \right\}. \quad (2)$$

În această relație $\partial_1$, $\partial_2$, $\partial_3$, $\varepsilon_1$ etc. au aceeași semnificație ca mai sus.

*) Gaiginschi E., Cernescu V., *Ciclul general al motoarelor cu ardere internă perfecte. Considerații asupra expresiilor generale ale randamentului termic și ale presiunii medii.* Bul. Inst. Polit. Iași (serie nouă), Tom I (v), fasc. 1—2, 1955.

4) *Expresia generală a presiunii medii* dată de relația

$$p_m = \frac{p_1}{\varepsilon - 1}\left\{\left[\lambda(\delta_1 - 1) + \lambda\delta_1 \ln \delta_2 + \frac{\lambda\delta_1}{k-1}\left(1 - \delta_2 \cdot \frac{\delta_1^{k-1}}{\varepsilon^{k-1}}\right)\right] - \right.$$

$$\left. - \left[\frac{1}{k-1}\left(1 - \frac{1}{\varepsilon_3^{k-1}}\right) + \frac{1}{\varepsilon_3^{k-1}} \ln \varepsilon_2 + \frac{1}{\varepsilon_3^{k-1}}(\varepsilon_1 - 1)\right]\right\}. \qquad (3)$$

Toate aceste expresii generale pot fi particularizate repede și ușor pentru oricare tip de ciclu; această particularizare constă în esență, în transformarea ciclului general, în ciclul dat, prin micșorarea pînă la zero a introducerilor sau a cedărilor de căldură ce lipsesc din ci lul considerat. Această micșorare pînă la zero a introducerilor sau a cedărilor de căldură este însoțită de variația parametrilor ce caracterizează transformările respective.

Pentru particularizarea expresiilor generale, în cazul unui anumit ciclu, adică pentru a determina condițiile respective de particularizare, trebuie ținut seama de următoarele:

— cînd introducerile sau cedările de căldură realizate sub volum variabil tind către zero, gradele parțiale de detentă ($\delta_1$, $\delta_2$) sau de compresie ($\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$), ce caracterizează aceste transformări, tind către 1 (fig. 8);

— cînd introducerea de căldură sub volum constant tinde către zero, raportul: $\lambda = \frac{p_5}{p_4} = \frac{p_5}{p_1} \cdot \frac{\delta_2 \delta_3^k}{\varepsilon_2 \varepsilon_3^k}$ tinde către 1, deoarece $p_5$ devine egal cu $p_4$;

— cînd cedarea de căldură sub volum constant tinde către zero (ceea ce înseamnă că $p_5$ tinde către $p_1$), atunci raportul $\lambda$ devine:

$$\lambda = \frac{\delta_2 \delta_3^k}{\varepsilon_2 \varepsilon_3^k};$$

— cînd din ciclu dispare un proces adiabatic, parametrul care caracterizează procesul respectiv ($\delta_3$ pentru detentă și $\varepsilon_3$ pentru compresie) devine 1.

Introducîndu-se în expresiile generale menționate mai sus, valorile pe care le iau parametrii $\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$, $\varepsilon_3$, $\delta_1$, $\delta_2$, $\delta_3$ și $\lambda$, în cazul unui ciclu dat, se obțin repede și ușor expresiile acelorași elemente pentru acest ciclu.

Așadar, expresiile elementelor de bază ale ciclului general, adică ale parametrilor din vîrfurile ciclului, ale randamentului termic, ale lucrului mecanic și ale presiunii medii, *reprezintă expresiile generale ale elementelor menționate pentru toate motoarele cu ardere internă perfecte cu introduceri și cedări de căldură neetajate.*

Particularizarea ușoară a expresiilor generale menționate, simplifică considerabil studiul teoretic al motoarelor cu ardere internă permițînd o vedere de ansamblu asupra tuturor tipurilor de motoare existente.

Trebuie adăugat că studiul variației randamentului termic, determinarea expresiei generale a randamentului termic în cazul călduri or specifice variabile cu temperatura, utilizarea expresiei generale a randa-

mentului termic în cazul introducerilor și cedărilor de căldură etajate, ca și rolul pe care îl are, în funcționarea motoarelor, introducerea izotermică a căldurii, sînt alte aplicații utile ale ciclului general; ele sînt în studiu.

$a_2$) *Altă aplicație a noțiunii „domeniul de reversibilitate a mașinilor termice", legată de forma și mărimea domeniilor*: Carnotizarea domeniilor fundamentale și expresia analitică a gradului de perfecție a ciclurilor în diagrama $T - S$.

Observația sugestivă a prof. Șt. Procopiu, că mașinile termice au diferite domenii de reversibilitate, indică de fapt o metodă nouă și anume: *metoda de a stabili gradul de perfecție a ciclurilor teoretice, prin compararea domeniilor de reversibilitate**). Plecînd de la această idee, am definit gradul de perfecție $\rho$ prin raportul:

$$\rho = \frac{D}{D_T},$$

în care:

$D$ este mărimea domeniului considerat, în diagrama $T - S$,

$D_r$ este mărimea domeniului izoterm, în diagrama $T - S$.

Să considerăm în diagramele $T - S$ și $p - v$ (fig. 9) cele trei domenii fundamentale ($D_T$, $D_p$ și $D_v$) limitate între aceleași limite de temperaturi

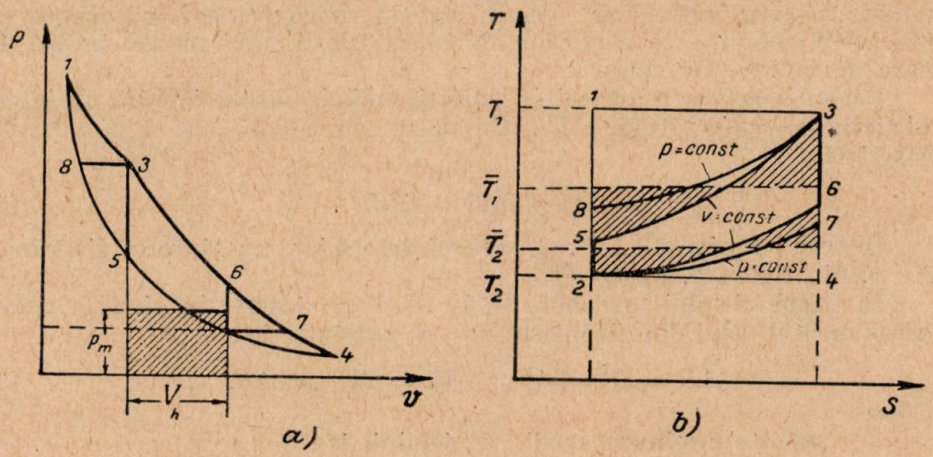



Fig. 9

$T_1$ și $T_2$ și între aceleași izentrope; ne propunem să stabilim, de pildă, gradul de prerfecție a ciclului izochor $\rho = \frac{D_v}{D_T}$, admițînd că $\Delta S$ este același cu $\Delta S$ Carnot.

Pentru determinarea gradului de perfecție a ciclului izochor, trebuie cunoscute mărimile $D_T$ și $D_v$.

---

*) Gaiginschi E., D'Albon G., *Utilizarea domeniilor de reversibilitate a mașinilor termice, pentru stabilirea gradului de perfecție a ciclurilor teoretice ale motoarelor reale.* Bul. Inst. Polit. Iași (seria nouă), Tom. 1 (v), fasc. 1—2, 1955.

Or, $D_T$ este dat de relația

$$D_T = \Delta T \times \Delta S. \tag{4}$$

În ceea ce privește $D_v$, el poate fi determinat fie prin planimetrarea ariei $2-5-3-6-2$, fie pe cale analitică. Cum planimetrarea ariei este mai puțin comodă, să determinăm mărimea $D_v$ pe cale analitică. În acest scop trebuie să exprimăm pe $D_T$ printr-o relație similară cu relația (4); or, pentru a exprima mărimea $D_v$ printr-o relație similară cu relația (4) înseamnă a reduce domeniul izochor la un domeniu de aceeași formă cu domeniul Carnot, adică a scrie o relație de carnotizare a domeniului izochor.

Așadar, problema determinării, pe cale analitică, a gradului de perfecție a ciclurilor, cu ajutorul domeniilor reversibile, atrage după sine necesitatea de a compara domenii de aceeași formă cu domeniul Carnot; această comparație este *condiționată de carnotizarea domeniilor*, adică de posibilitatea de a scrie pentru domeniile respective relații de același tip cu relația (4).

Dar, dacă am căuta să exprimăm mărimea $D_v$ printr-o relație similară cu relația (4), constatăm că intervine o dificultate, și anume în cazul ciclului reversibil izochor nu mai poate fi vorba de un singur interval $T_1 - T_2 = \Delta T$ const., ci de o infinitate de intervale de temperaturi. Aceasta, pentru motivul că reversibilitatea termică a ciclurilor izochore, ca și a celor izobare este condiționată de utilizarea unui număr infinit de mare de izvoare de căldură.

Pentru rezolvarea acestei dificultăți, trebuie să considerăm un interval fictiv de temperatură, $\Delta T'$, să-i zicem echivalent, care să ne permită să scriem

$$D_v = \Delta T' \times \Delta S. \tag{5}$$

În ceea ce privește $\Delta T'$, el poate fi determinat cu ajutorul diagramei $p - v$, din figura 9, *a*), astfel:

În cazul ciclului izochor $2-5-3-6-2$, înscris în ciclul Carnot, corespunzător celui din diagrama $T - S$, putem scrie:

$$AL = D_v = Ap_m \times V_h = \Delta T' \times \Delta S, \tag{6}$$

în care:

$p_m$ este presiunea medie a ciclului, iar
$V_h$ — cilindreea.

Deci

$$\Delta T' = \frac{D_v}{\Delta S} = \frac{A\, p_m \times V_h}{\Delta S}, \tag{7}$$

așa încît

$$\rho = \frac{D_v}{D_T} = \frac{\Delta T'}{\Delta T}. \tag{8}$$

Așadar, noțiunea „domeniul de reversibilitate a mașinilor termice" este încă un mijloc, care permite stabilirea gradului de perfecție a ciclurilor

teoretice (sub condiția aceloraşi temperaturi extreme şi a aceleiaşi variații de entropie), prin carnotizarea ciclului.

*Observații.* Între aceleaşi limite de temperaturi şi pentru aceeaşi variație de entropie, expresia analitică a gradului de perfecție a ciclurilor teoretice, poate fi scrisă sub următoarele forme :

1) Sub forma de mai sus :

$$\rho = \frac{D_v}{D_T} = \frac{\Delta T'}{\Delta T}, \tag{8}$$

în care $\Delta T'$ şi $\Delta T$ au semnificațiile şi valorile menționate.

Pentru a ajunge la această expresie, trebuie să scriem relația (5), care reprezintă o relație pentru carnotizarea domeniilor numai în ceea ce priveşte forma şi mărimea lor. Această relație (5) nu ține seama de poziția în diagrama $T - S$ a domeniului carnotizat.

2) Putem scrie gradul de perfecție şi sub altă formă, ținînd seama de principiile generale de comparație a ciclurilor teoretice, prin carnotizarea lor cu ajutorul temperaturilor medii sub care se introduce şi se cedează căldura din cicluri. Această metodă de comparație a ciclurilor, este expusă în lucrarea prof. M. P. Vukalovici şi I. I. Novikov [2]*).

Dacă însemnăm cu $\overline{T}_1$ şi $\overline{T}_2$ (a se vedea fig. 9, *b*) temperaturile medii sub care se introduce şi se cedează căldura (de pildă din ciclul izochor), atunci

$$\rho = \frac{D_v}{D_T} = \frac{\overline{T}_1 - \overline{T}_2}{T_1 - T_2}, \tag{9}$$

în care $T_1$ se determină din relația

$$\overline{T}_1 (S_3 - S_5) = C_v (T_3 - T_5) \tag{10}$$

şi deoarece

$$S_3 - S_5 = C_v \ln \frac{T_3}{T_5}, \tag{11}$$

obținem

$$\overline{T}_1 = \frac{T_3 - T_5}{\ln \dfrac{T_3}{T_5}}; \tag{12}$$

procedînd la fel, găsim pentru $T_2$ expresia

$$\overline{T}_2 = \frac{T_6 - T_2}{\ln \dfrac{T_6}{T_2}} \tag{13}$$

*) § 161.

și deoarece în cazul ciclului izochor $\frac{T_3}{T_5} = \frac{T_6}{T_2}$ și cum $T_3 = T_1$, obținem în cele din urmă

$$\rho = \frac{(T_1 - T_5) - (T_6 - T_2)}{(T_1 - T_2^{\varphi})]_D \frac{T_1}{T_5}}. \tag{14}$$

Așadar, putem ajunge la expresia analitică a gradului de perfecție a ciclurilor și prin carnotizarea domeniilor cu ajutorul temperaturilor medii, adică scriind relații similare cu relația (10). Această relație (10) are avantajul că fixează în diagrama $T - S$ poziția domeniului carnotizat.

3) În sfîrșit, în condițiile fixate și pentru ciclul izochor, de pildă, putem scrie încă :

$$\rho = \frac{D_v}{D_T} = \frac{L_v}{L_T}, \tag{15}$$

în care

$L_v$ este lucrul mecanic produs în ciclul izochor, iar

$L_T$ este lucrul mecanic produs în ciclul Carnot.

Trebuie remarcat că în condițiile fixate, existența ciclului general și expresiile generale ale presiunii medii și ale lucrului mecanic, permit determinarea expresiilor generale ale gradului de perfecție, pentru toate ciclurile teoretice ale motoarelor cu ardere internă, utilizînd în acest scop cele trei metode menționate.

## CONCLUZII

1) Plecîndu-se de la noțiunea nouă, „domeniul de reversibilitatea mașinii termice", introdusă în Termodinamică de prof. Șt. P r o c o p i u și studiată de acesta în cazul motorului termic cu introducere și cedare de căldură sub temperaturi constante, s-a extins această noțiune și la motoarele termice la care introducerea și cedarea căldurii se efectuează fie sub presiuni constante, fie sub volume constante.

Procedînd astfel, s-a stabilit că cele trei domenii fundamentale ale mașinilor termice sînt următoarele : domeniul de reversibilitate izoterm $D_T$, domeniul de reversibilitate izochor $D_v$ și domeniul de reversibilitate izobar $D_p$.

2) Stabilirea acestor trei tipuri de domenii a condus la determinarea proprietățile acestora și anume : *forma*, *mărimea*, *poziția* și *randamentul unitar al transformării căldurii reversibile în lucru mecanic*, *în sensul principiului echivalenței.*

Primele trei proprietăți sînt *calitative* ; a patra este cantitativă. Toate aceste proprietăți sînt strîns legate între ele.

3) Aplicarea la studiul motoarelor cu ardere internă a primelor două proprietăți (forma și mărimea domeniilor) în condițiile fixate, au condus la două rezultate :

*a*) în primul rînd, la clasificarea calitativă a celor trei feluri de a introduce și ceda căldura din cicluri precum și la clasificarea calitativă a domeniilor, în ordinea: domeniul izoterm, izobar și izochor. Pentru aceste domenii avem:

$$D_T > D_p > D_v;$$

*b*) în al doilea rînd, la posibilitatea de a mări indicii calitativi ai motoarelor termice, prin mărirea domeniilor de reversibilitate, utilizînd ca metodă combinarea între ele a celor trei feluri de a introduce și a ceda căldura din cicluri, ceea ce conduce la necesitatea de a crea tipuri noi de motoare.

Pentru determinarea analitică a gradului de perfecție a ciclurilor teoretice cu ajutorul domeniilor de reversibilitate, s-a introdus noțiunea: „carnotizarea domeniilor".

4) Utilizînd metoda menționată, pentru creșterea indicilor calitativi ai motoarelor teoretice, s-a ajuns la „*domeniul general de reversibilitate*" a motoarelor cu ardere internă.

Acest domeniu general ne-a dat posibilitatea să determinăm expresiile generale ale elementelor de bază pentru toate ciclurile motoarelor cu ardere internă perfecte, în care introducerea și cedarea căldurii se efectuează neetajat și într-o ordine calitativă. Aceste expresii se referă la:

*a*) expresiile generale ale parametrilor din vîrfurile ciclurilor;

*b*) expresia generală a randamentului termic;

*c*) expresia generală a lucrului mecanic;

*d*) expresia generală a presiunii medii.

Aplicațiile celorlalte proprietăți ale domeniilor de reversibilitate, ca și extinderea rezultatelor obținute, sînt în studiu.

## ОБЛАСТЬ ОБРАТИМОСТИ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

### ПРИМЕНЕНИЕ ЭТОГО ПОНЯТИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Исходя из понятия «области обратимости теплового двигателя», введенного в термодинамику профессором С. Прокопиу в 1948 году и исследованного им для случая теплового двигателя с подводом и отдачей тепла при постоянной температуре, автор настоящей работы задался целью применить это понятие к исследованию двигателей внутреннего сгорания.

С этой целью он распространяет это понятие и на двигатели, у которых подвод и отдача тепла совершается либо при постоянном давлении, либо при постоянном объеме, и устанавливает для тепловых двигателей три основных обратимых области: изотермическую, изобарную и изохорную.

Полагая, что эти три области имеют те же температурные пределы и то же изменение энтропии, он определяет их свойства, а именно: форму, величину, положение и удельный коэффициент полезного действия при преобразовании обратимой теплоты в механическую работу, в смысле принципа эквивалентности.

Применение в упомянутых условиях к исследованию двигателей внутреннего сгорания первых двух свойств (форма и величина областей) приводит к двум результатам:

1. К качественной классификации трех видов подвода и отдачи теплоты из циклов, а также и к качественной классификации областей в вышеуказанном порядке — изотермической, изобарной и изохорной областей.

2. К возможности увеличивать качественные показатели двигателей внутреннего сгорания путем увеличения областей обратимости, используя в качестве способа комбинирование между ними трех видов подвода и отдачи теплоты из циклов, что приводит к необходимости создавать новые типы двигателей.

Применяя этот метод, автор пришел к понятию «общей области обратимости» двигателей внутреннего сгорания, которая дала ему возможность определить общие выражения основных элементов для всех идеальных циклов двигателей внутреннего сгорания, в которых подвод и отдача тепла осуществляется не ступенчато и в качественном порядке, Эти выражения относятся:

а) к общим выражениям параметров в концах циклов,

б) к общему выражению термического коэффициента полезного действия,

в) к общему выражению механической работы,

г) к общему выражению среднего давления.

## LE DOMAINE DE RÉVERSIBILITÉ DES MACHINES THERMIQUES

### LES APPLICATIONS DE CETTE NOTION À L'ÉTUDE DES MOTEURS À COMBUSTION INTERNE

(RÉSUMÉ)

Partant de la notion „domaine de réversibilité de la machine thermique", introduite en thermodynamique par Şt. Procopiu, en 1948, et étudiée par celui-ci dans le cas du moteur thermique avec apport et retrait de chaleur à des températures constantes, l'auteur s'est proposé d'appliquer cette notion à l'étude des moteurs à combustion interne.

Dans ce but, il étend cette notion aux moteurs dans lesquels l'apport et le retrait de la chaleur s'effectuent soit à des pressions constantes, soit à des volumes constants, et établit, pour les moteurs thermiques, trois domaines réversibles fondamentaux : isotherme, isobare et isochore.

Considérant, pour les trois domaines fondamentaux, les mêmes limites de température et la même variation d'entropie, il en détermine les

propriétés : forme, grandeur, position et rendement unitaire de la transformation de la chaleur réversible en travail mécanique, au sens du principe de l'équivalence.

L'application à l'étude des moteurs à combustion interne des deux premières propriétés (forme et grandeur des domaines), dans les conditions mentionnées, a conduit à deux résultats :

1° à la classification qualitative des trois sortes d'apports et de retraits de la chaleur des cycles, ainsi qu'à la classifications qualitative des domaines dans l'ordre : isotherme, isobare et isochore ;

2° à la possibilité d'augmenter les indices qualitatifs des moteurs à combustion interne, par l'augmentation des domaines de réversibilité ; la méthode employée est celle de combinaisons entre elles des trois manières d'introduire et de céder la chaleur des cycles, ce qui conduit à la nécessité de créer des types nouveaux de moteurs.

En utilisant cette méthode, l'auteur est arrivé au domaine général de réversibilité des moteurs à combustion interne, ce qui lui a permis de déterminer les expressions générales des éléments de base pour tous les cycles des moteurs à combustion interne parfaite dans lesquels l'apport et le retrait de la chaleur s'effectue d'une façon continue (non étagée) et dans un ordre qualitatif. Ces expressions se rapportent aux :

*a*) expressions générales des paramètres des sommets des cycles ;
*b*) expression générale du rendement thermique ;
*c*) expression générale du travail mécanique ;
*d*) expression générale de la pression moyenne.

## BIBLIOGRAFIE

1. Ş t. P r o c o p i u, *Termodinamica*, 1948.
2. M. P. V u k a l o v i c i i I. I. N o v i k o v, *Tehniceskaia termodinamika*, Moscova, 1952.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 4, 1956

*ELECTROENERGETICĂ ŞI ELECTROTEHNICĂ*

# CÎTEVA PRECIZĂRI ÎN LEGĂTURĂ CU APLICAREA DE CĂTRE G. KRON A CALCULULUI MATRICIAL ÎN STUDIUL REŢELELOR ELECTRICE COMPLEXE *)

DE

AL. FRANSUA

Aplicarea calculului matricial în studiul reţelelor electrice complexe se datorează lui G. Kron [1], [2].

G. Kron a dezvoltat în numeroase lucrări această metodă care a cucerit cercuri largi de electrotehnicieni, cu atît mai mult cu cît în ultimul timp tehnica electronică a reuşit construirea unor mese de calcul sau a unor „creeri electronici" care execută, în cîteva clipe, complicate operaţii matematice cu matrici.

Totuşi această metodă a primit o serie de critici, în bună parte justificate, în deosebi din partea unor specialişti sovietici [3], [4]. Noi credem că teoria lui G. Kron, dezvoltată în cele două lucrări avute la dispoziţie, necesită unele precizări. Pentru ca aceste precizări să fie clare, vom fi nevoiţi să expunem pe scurt două demonstraţii, care aparţin lui G. Kron şi sînt reluate şi în alte lucrări [5], [6], prima se referă la studiul reţelelor electrice complexe, iar cea de a doua la interconexiunea reţelelor.

A. Fie dată o reţea electrică complexă (fig. 1). Pentru studiul acestei reţele se va utiliza o transformare a reţelei date în alta mai simplă, presupunîndu-se cunoscute pentru reţeaua dată, tensiunile electromotoare $\|e\|$ şi diversele impedanţe $\|Z\|$ ale laturilor, necunoscute fiind curenţii $\|i\|$ şi puterea absorbită de reţea $\|P\| = \|e_t\| \cdot \|i\|$. Se introduce apoi noţiunea de *reţea aprimitivă* (fig. 2), care se obţine din reţeaua dată desfăcînd toate conexiunile dintre elementele acesteia şi legîndu-le în scurtcircuit. Se obţine astfel o serie de bucle independente, care sînt formate din impedanţele şi tensiunile electro-

*) Lucrare prezentată Institutului de energetică la data de 11 mai 1956.

motoare ale laturii respective din rețeaua dată. Fiecare buclă va fi parcursă de curentul din latura respectivă. Vom avea atîtea bucle primitive cîte laturi avea rețeaua dată.

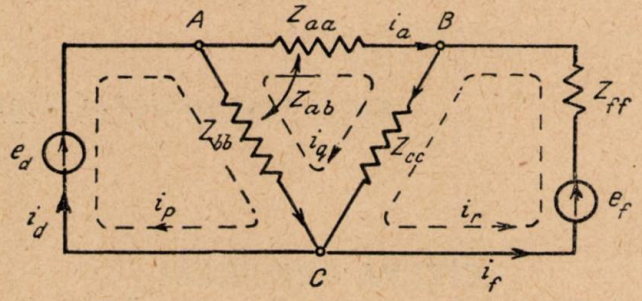



Fig. 1

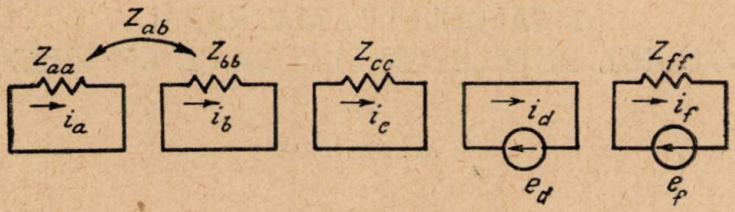



Fig. 2

Se afirmă apoi că oricare ar fi transformarea ce dorim s-o realizăm, legea lui Ohm

$$\| e \| = \| Z \| \cdot \| i \| \tag{1}$$

și puterea absorbită de rețea

$$\| P \| = \| e_t \| \cdot \| i \| \tag{2}$$

sînt invariante. Transformarea este realizată cu ajutorul matricei de conexiune $\| C \|$, definită de relația

$$\| i \| = \| C \| \cdot \| i' \|, \tag{3}$$

$\| i' \|$ fiind curenții ciclici independenți ai rețelei date, arbitrari ca alegere, dar precizați ca număr. Fie $\| e' \|$, $\| Z' \|$ matricea tensiunilor electromotoare, respectiv a impedanțelor din rețeaua rezultată în urma transformării. Aceste matrici se obțin ușor pe baza condițiilor (1) și (2). Astfel, din

$$\| P \| = \| e_t \| \cdot \| i \| = \| e'_t \| \cdot \| i' \| = \| e_t \| \cdot \| C \| \cdot \| i' \|,$$

rezultă

$$\| e' \| = \| C_t \| \cdot \| e \|, \tag{4}$$

iar din invarianța legii lui Ohm

$$\| e \| = \| Z \| \cdot \| i \| = \| Z \| \cdot \| C \| \cdot \| i' \|,$$

sau

$$\| e' \| = \| C_t \| \cdot \| e \| = \| C_t \| \cdot \| Z \| \cdot \| C \| \cdot \| i' \| = \| Z' \| \cdot \| i' \|,$$

rezultă

$$\| Z' \| = \| C_t \| \cdot \| Z \| \cdot \| C \|. \tag{5}$$

Curenții din rețeaua nouă se calculează imediat

$$\| i' \| = \| Z' \|^{-1} \cdot \| e' \|. \tag{6}$$

Cum curenții ciclici $\| i' \|$ sînt mai puțini ca număr decît curenții reali $\| i \|$, înseamnă că s-a ajuns la un sistem de ecuații (6) mai simplu decît (1).

**B.** Iată acum a doua demonstrație. Fie date două rețele $R_1$ și $R_2$ (fig. 3), care au fost studiate

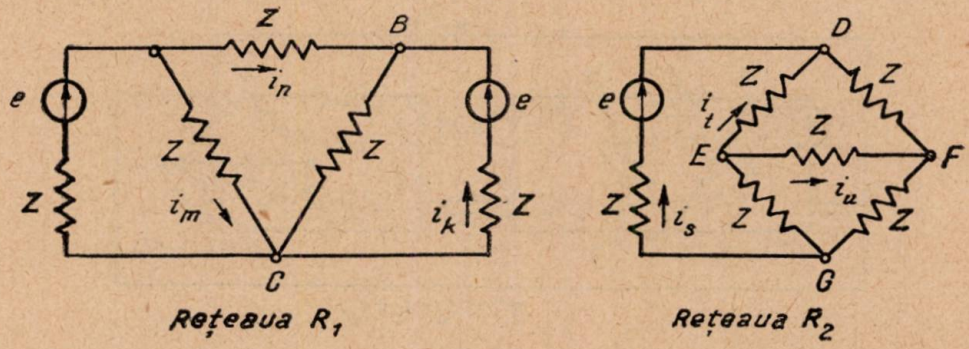



Fig. 3

și la care se cunosc matricile :

$$\| e_1 \| = \begin{array}{c|c} m & e \\ \hline n & e \\ \hline k & e \end{array}; \quad \| i_1 \| = \begin{array}{c|c} m & i_m \\ \hline n & i_n \\ \hline k & i_k \end{array}; \quad \| Z_1 \| = \begin{array}{c|c|c|c} & m & n & k \\ \hline m & 2Z & Z & \\ \hline n & Z & 3Z & Z \\ \hline k & & Z & 2Z \end{array};$$

$$\| e_2 \| = \begin{array}{c|c} s & e \\ \hline t & \\ \hline u & \end{array}; \quad \| i_2 \| = \begin{array}{c|c} s & i_s \\ \hline t & i_t \\ \hline u & i_u \end{array}; \quad \| Z_2 \| = \begin{array}{c|c|c|c} & s & t & u \\ \hline s & 3Z & 2Z & Z \\ \hline t & 2Z & 4Z & 2Z \\ \hline u & Z & 2Z & 3Z \end{array}$$

(această demonstrație a interconexiunii rețelelor o redau pe baza unui exemplu concret, datele de calcul fiind necesare mai tîrziu).

Ansamblul acestor rețele poate fi exprimat printr-o singură ecuație matricială :

$$\| e \| = \| Z \| \cdot \| i \|,$$

în care

$$\| e \| = \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \end{matrix} \left| \begin{matrix} \| e_1 \| \\ \| e_2 \| \end{matrix} \right| ; \quad \| i \| = \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \end{matrix} \left| \begin{matrix} \| i_1 \| \\ \| i_2 \| \end{matrix} \right| ; \quad \| Z \| = \begin{matrix} & R_1 & R_2 \\ R_1 & \| Z_1 \| & \\ R_2 & & \| Z_2 \| \end{matrix} .$$

Se interconectează cele două rețele într-un mod oarecare, obținîndu-se rețeaua complexă $R$ (fig. 4), în care se pot alege drept curenți ciclici inde-

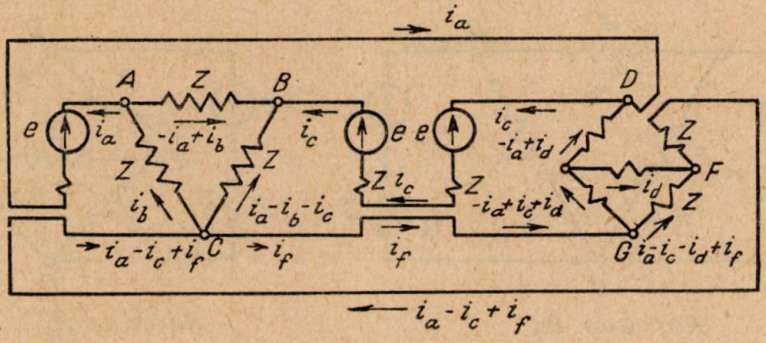



Fig. 4

pendenți curenții $i_a$, $i_b$, $i_c$, $i_d$, $i_f$. Matricea de conexiune $\| C \|$ se determină scriind vechii curenți în funcție de noii curenți

$$\begin{aligned} i_m &= -i_b ; & i_s &= -i_c ; \\ i_n &= -i_a + i_b ; & i_t &= -i_a + i_c ; \\ i_k &= i_f ; & i_u &= i_d . \end{aligned}$$

Prin urmare

$$\| C \| = \begin{matrix} & a & b & c & d & f \\ m & & -1 & & & \\ n & -1 & 1 & & & \\ k & & & & & 1 \\ s & & & -1 & & \\ t & -1 & & 1 & & \\ u & & & & 1 & \end{matrix} = \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \end{matrix} \left| \begin{matrix} \| C_1 \| \\ \| C_2 \| \end{matrix} \right| .$$

Notînd cu $\| e' \|$, $\| Z' \|$, $\| i' \|$ matricele caracteristice ale noii rețele, se obține la fel ca în prima demonstrație

$$\| e' \| = \| C_t \| \cdot \| e \|,$$
$$\| Z' \| = \| C_t \| \cdot \| Z \| \cdot \| C \|$$

și

$$\| e' \| = \| Z' \| \cdot \| i' \|.$$

În cazul rețelei din figura 4 se obține

$$\begin{array}{c|c} a & -e \\ \hline b & \\ \hline c & -e \\ \hline d & \\ \hline f & e \end{array} = \begin{array}{c|ccccc} & a & b & c & d & f \\ \hline a & 7Z & -2Z & -2Z & -2Z & -Z \\ \hline b & -2Z & 3Z & & & Z \\ \hline c & -2Z & & 3Z & Z & \\ \hline d & -2Z & & Z & 3Z & \\ \hline f & -Z & Z & & & 2Z \end{array} \cdot \begin{array}{c|c} a & i_a \\ \hline b & i_b \\ \hline c & i_c \\ \hline d & i_d \\ \hline f & i_f \end{array}.$$

Acest sistem de ecuații are următoarea soluție :

$$i_a = -\frac{13}{36} \cdot \frac{e}{Z}; \quad i_b = -\frac{15}{36} \cdot \frac{e}{Z}; \quad i_c = -\frac{20}{36} \cdot \frac{e}{Z};$$

$$i_d = -\frac{2}{36} \cdot \frac{e}{Z}; \quad i_f = \frac{19}{36} \cdot \frac{e}{Z}.$$

C. Prima demonstrație are după aprecierea noastră o serie de lipsuri.

*a*) În primul rînd ni se pare complet neargumentată introducerea rețelei primitive cu toate aceste bucle independente. O întrebare se impune imediat : de ce curentul într-o buclă oarecare este egal cu curentul din latura respectivă a rețelei date ? Mai concret, de ce în bucla *b* (a doua din figura 2) echivalentă laturii *b* din rețeaua dată, curentul are valoarea $i_b$, cînd $e_b = 0$ și în mod normal în buclă nu este curent ?

*b*) Relația matricială (1) de la care se pleacă și care reprezintă un sistem de relații între mărimile rețelei date este falsă. Într-adevăr, în cazul rețelei din figura 1, relația matricială (1) înseamnă următorul șir de relații :

$$\begin{aligned} 0 &= Z_{aa} i_a + Z_{ab} i_b, \\ 0 &= Z_{ab} i_b + Z_{bb} i_b, \\ 0 &= Z_{cc} i_c \\ e_d &= 0, \\ e_f &= Z_{ff} i_f. \end{aligned}$$

O simplă privire ne convinge de justețea celor afirmate [$i_c = 0$, indiferent de valoarea tensiunilor electromotoare $e_d$ și $e_f$ (? !), sau din $e_d \neq 0$ rezultă $e_d = 0$ (? !)].

*c*) În demonstrație se face apel la condiția suplimentară de invarianță a puterilor absorbite. Or, se știe că din teoremele lui Kirchhoff rezultă și relațiile energetice ale rețelei și ar trebui să rezulte și în cazul nostru invarianța puterii absorbite. În cazul demonstrației lui G. K r o n prima teoremă a lui Kirchhoff s-a folosit în relația matricială (3), iar cea de-a doua teoremă în relația (1), deși această ultimă relație nu este justă sub forma în care a fost scrisă. Prin urmare, apelarea la o condiție suplimentară demonstrează încă o dată că raționamentul lui G. K r o n nu este corect.

S-ar mai putea adăuga la cele de mai sus și observația că, condiția de invarianță poate să fie numai o consecință a transformării și nu o premisă, fiindcă se pot imagina rețele care să absoarbă de la sursele sale interioare aceeași putere fără ca rețelele să rezulte una din alta printr-o transformare de tipul (3).

**D.** Vom da, dat fiind lipsurile demonstrației lui G. K r o n, o nouă demonstrație a metodei de calcul matricial al unei rețele, care să nu facă apel la vreo rețea primitivă și să fie riguroasă și mai generală.

Fie o rețea în care se cunosc tensiunile electromotoare interne $\| e \|$, impedanțele proprii și mutuale $\| Z \|$ ale laturilor și tensiunilor aplicate din exterior $\| u_a \|$. Fie $\| u \|$ tensiunile între capetele fiecărei laturi și

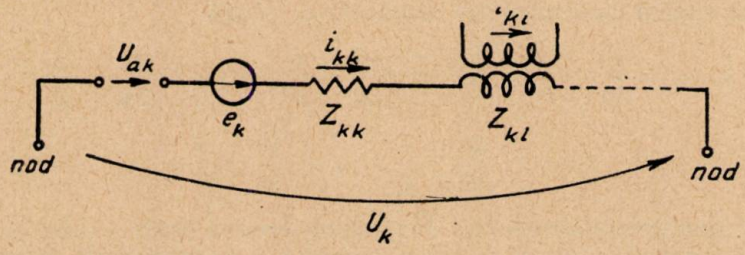



Fig. 5

$\| i \|$ curenții din laturi. Pentru această rețea (fig. 5) se poate scrie, pe baza teoremei a doua a lui Kirchhoff

$$\| u \| - \| u_a \| + \| e \| = \| Z \| \cdot \| i \| . \qquad (1')$$

Se remarcă că de data aceasta relația de la care se pleacă are un sens fizic bine precizat.

Supunem rețeaua dată la o transformare de tipul cunoscut, relația (3).

Să remarcăm că, pe baza teoremei conservării puterii în rețeaua dată

$$(- \| u_{at} \| + \| e_t \|) . \| i \| \equiv \| i_t \| \cdot \| Z_t \| \cdot \| i \|,$$

rezultă

$$\| u_t \| \cdot \| i \| \equiv 0,$$

sau folosind relația de transformare (3)

$$\| C_t \| \cdot \| u \| \equiv 0.$$

Prin urmare, dacă înmulțim ambii membri ai relației (1′) cu matricea $\| C_t \|$, reușim să facem să dispară necunoscutele $\| u \|$, rămînînd numai necunoscutele $\| i' \|$:

$$- \| C_t \| \cdot \| u_a \| + \| C_t \| \cdot \| e \| = \| C_t \| \cdot \| Z \| \cdot \| C \| \cdot \| i' \|.$$

Notînd

$$\| u'_a \| = \| C_t \| \cdot \| u_a \|,$$
$$\| e' \| = \| C_t \| \cdot \| e \|,$$
$$\| Z' \| = \| C_t \| \cdot \| Z \| \cdot \| C \|,$$

se obține

$$- \| u'_a \| + \| e' \| = \| Z' \| \cdot \| i' \|, \tag{6′}$$

sau

$$\| i' \| = (- \| u'_a \| + \| e' \|) \cdot \| Z' \|^{-1}. \tag{6″}$$

Dacă nu există tensiuni aplicate, $\| u_a \| = 0$, se obține același rezultat ca și în demonstrația lui G. K r o n. Relația

$$\| e_t \| \cdot \| i \| = \| e'_t \| \cdot \| i' \|$$

rezultă ca o consecință, din cele de mai sus.

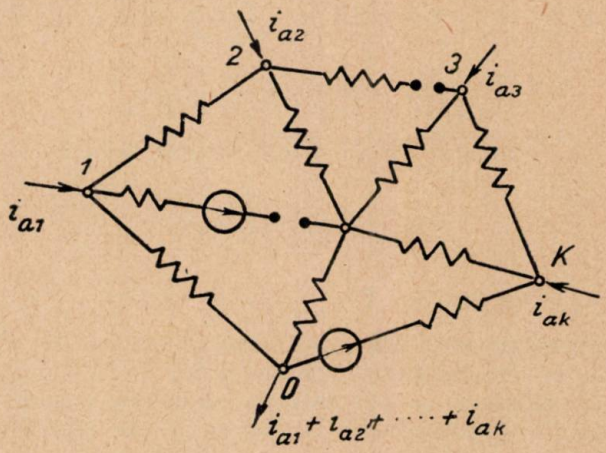



Fig. 6

E. Cam de aceleași lipsuri suferă și demonstrația care se bazează pe transformarea tensiunilor între noduri.

Vom da și în acest caz o demonstrație riguroasă și mai generală.

Fie o rețea electrică complexă (fig. 6), avînd legături cu exteriorul nu numai prin tensiuni aplicate, ci și prin curenții $\| i_a \|$ care intră în cele $K$ noduri ale rețelei.

Fie un nod oarecare 0 luat ca referință. Se pot considera ca necunoscute ale problemei tensiunile $\| u' \|$ între un nod oarecare și nodul 0 de referință. Tensiunile $\| u \|$ între capetele laturilor rețelei sînt legate de tensiunile $\| u' \|$ printr-o relație de forma

$$\| u \| = \| C \| \cdot \| u' \|. \tag{7}$$

Din teorema a doua a lui Kirchhoff, aplicată unei laturi, rezultă

$$\| Y \| \cdot ( \| u \| - \| u_a \| + \| e \| ) = \| i \|, \tag{8}$$

$\| i \|$ fiind curenții din laturi.

Cum puterea absorbită de rețea, din exterior, poate fi exprimată în două feluri

$$\| P \| = \| i_t \| \cdot \| u \| \equiv \| i_{at} \| \cdot \| u' \|,$$

prima expresie fiind suma puterilor absorbite de fiecare latură în parte, iar a doua expresie rezultînd din teorema celor $(K - 1)$ wattmetre și dacă ținem seamă și de relația (7) se obține

$$\| C_t \| \cdot \| i \| = \| i_a \|.$$

Prin urmare, dacă înmulțim ambii membri ai relației (8) cu $\| C_t \|$ reușim să eliminăm necunoscutele $\| i \|$, rămînînd numai necunoscutele $\| u' \|$

$$\| C_t \| \cdot \| Y \| \cdot \| C \| \cdot \| u' \| + \| C_t \| \cdot \| Y \|. \ (- \| u_a \| + \| e \|) = \| i_a \|.$$

Notînd

$$\| C_t \| \cdot \| Y \| \cdot \| C \| = \| Y' \|,$$

$$\| C_t \| \cdot \| Y \|. (- \| u_a \| + \| e \|) = \| i' \|,$$

se obține

$$\| Y' \| \cdot \| u' \| = \| i_a \| - \| i' \|,$$

sau

$$\| u' \| = \| Y' \|^{-1} \cdot ( \| i_a \| - \| i' \|), \tag{9}$$

adică același rezultat ca și în cazul demonstrației lui G. Kron [2].

**F.** Relativ la demonstrația a doua a lui G. Kron, referitoare la interconexiunea rețelelor, se pot face de asemenea o serie de observații.

*a*) În primul rînd o întrebare : de ce se ia, la stabilirea matrici de conexiune $\| C \|$, $i_k = i_f$ și nu $i_k = - i_c$ sau de ce se ia $i_s = - i_c$ și nu $i_s = i_f$? S-ar putea obține atunci pentru o interconexiune dată, patru matrici de conexiuni diferite. Care este cea bună?

*b*) În al doilea rînd, matricea $\| C \|$ nu reflectă interconexiunea dată între laturi. Astfel, la o matrice $\| C \|$ dată, pot corespunde mai multe interconexiuni, de fiecare dată obținîndu-se cu totul alte rețele. Astfel, latura $CB$ cu sursa $e$ (fig. 4) din rețeaua $R_1$, poate fi interconectată cu latura $DG$ din rețeaua $R_2$ în mai multe feluri (fig. 7), matricea $\| C \|$ rămînînd aceeași.

*c*) În al treilea rînd, pentru rețelele $R_1$ și $R_2$, cu mai mult de două interconexiuni, pentru care sînt valabile și observațiile de mai sus, se ajunge la rezultate de-a dreptul eronate. Astfel, curenții calculați pe baza

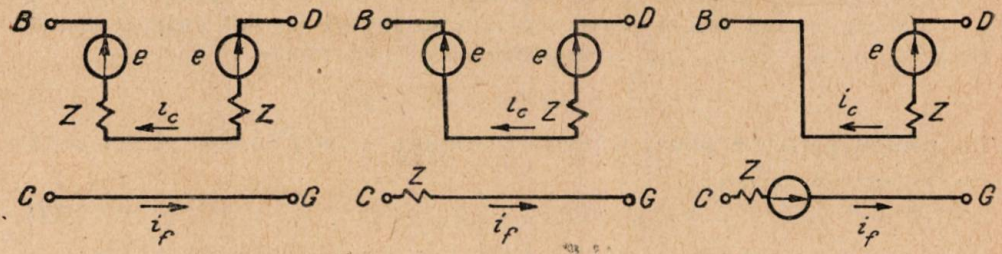



Fig. 7

formulelor lui G. K r o n, scrișI la sfîrșitul punctului **B** sînt departe de a fi cei reali din rețeaua din figura 4.Curenții reali, calculați cu altă metodă, sînt

$$i_a = -\frac{64}{153} \cdot \frac{e}{Z}; \quad i_b = -\frac{33}{153} \cdot \frac{e}{Z}; \quad i_c = -\frac{29}{153} \cdot \frac{e}{Z};$$

$$i_d = -\frac{14}{153} \cdot \frac{e}{Z}; \quad i_f = -\frac{28}{153} \cdot \frac{e}{Z}.$$

Prin urmare, nu se poate face, așa cum a arătat G. K r o n, studiul unei rețele complicate pe baza studiului anterior făcut asupra unor părți ale rețelei, părți considerate independente, dacă numărul interconexiunilor este mai mare decît doi.

**G.** Dacă ținem seama de natura interconexiunilor, se poate folosi studiul pe părți de rețea. Pentru a arăta această posibilitate, să considerăm o rețea complexă (fig. 8), tăiată în două părți I și II. În figură s-au

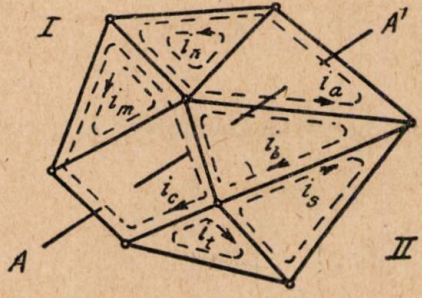



Fig. 8

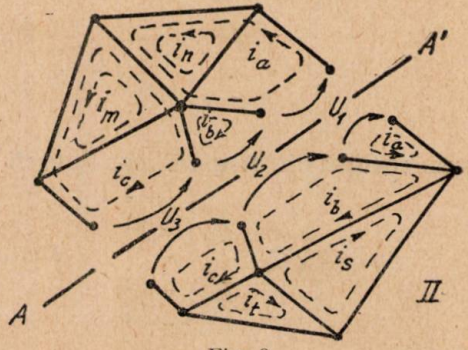



Fig. 9

desenat și curenții ciclici independenți. Fie $i_a$, $i_b$, $i_c$, ... curenții ciclici ai rețelei complexe care sînt tăiați de axa $AA'$, care desparte rețeaua dată în cele două părți; $i_m$, $i_n$, ... ceilalți curenți ciclici din partea I, iar $i_s$,

$i_t, \ldots$ ceilalți curenți ciclici din partea II. Pentru fiecare parte sînt mai puțini curenți ciclici decît pentru rețeaua întreagă, rezultată din interconexiunea celor două părți. Fiecare parte poate fi studiată separat, cu condiția de a înlocui influența celeilalte părți prin tensiuni aplicate (fig. 9).

Astfel, pentru prima parte studiată în raport cu alți curenți ciclici decît $i_a, i_b, i_c, \ldots, i_m, i_n, \ldots$ se poate scrie [vezi relația (6′)]

$$-\| u_{a\mathrm{I}} \| + \| e_{\mathrm{I}} \| = \| Z_{\mathrm{I}} \| \cdot \| i_{\mathrm{I}} \|, \tag{10}$$

iar pentru partea a doua, studiată în raport cu alți curenți ciclici decît $i_a, i_b, i_c, \ldots, i_s, i_t, \ldots$

$$-\| u_{a\mathrm{II}} \| + \| e_{\mathrm{II}} \| = \| Z_{\mathrm{II}} \| \cdot \| i_{\mathrm{II}} \|. \tag{11}$$

Fie $\| C \|$ matricea de legătură între vechii curenți ciclici cu care s-a studiat fiecare parte și curenții ciclici $i_a, i_b, i_c, \ldots, i_m, i_n, \ldots, i_s, i_t, \ldots$

$$\begin{matrix} R_1 \\ R_2 \end{matrix} \left| \begin{matrix} \| i_{\mathrm{I}} \| \\ \hline \| i_{\mathrm{II}} \| \end{matrix} \right| = \| C \| \cdot \| i \|. \tag{12}$$

Ținînd seama și de relația (12), relațiile (10) și (11) se pot scrie împreună

$$-\begin{matrix} R_1 \\ R_2 \end{matrix} \left| \begin{matrix} \| u_{a\mathrm{I}} \| \\ \hline \| u_{a\mathrm{II}} \| \end{matrix} \right| + \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \end{matrix} \left| \begin{matrix} \| e_{\mathrm{I}} \| \\ \hline \| e_{\mathrm{II}} \| \end{matrix} \right| = \begin{matrix} & R_1 & R_2 \\ R_1 \\ R_2 \end{matrix} \left| \begin{matrix} \| Z_{\mathrm{I}} \| & \\ \hline & \| Z_{\mathrm{II}} \| \end{matrix} \right| \cdot \| C \| \cdot \| i \|.$$

Remarcînd că

$$\| C_t \| \cdot \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \end{matrix} \left| \begin{matrix} \| u_{a\mathrm{I}} \| \\ \hline \| u_{a\mathrm{II}} \| \end{matrix} \right| \equiv 0$$

cum rezultă din teorema conservării puterii în rețeaua complexă și notînd

$$\| e \| = \| C_t \| \cdot \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \end{matrix} \left| \begin{matrix} \| e_{\mathrm{I}} \| \\ \hline \| e_{\mathrm{II}} \| \end{matrix} \right| ; \quad \| Z \| = \| C_t \| \cdot \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \end{matrix} \left| \begin{matrix} \| Z_{\mathrm{I}} \| & \\ \hline & \| Z_{\mathrm{II}} \| \end{matrix} \right| \cdot \| C \|$$

se obține

$$\| e \| = \| Z \| \cdot \| i \|. \tag{13}$$

Această demonstrație scoate în evidență eroarea lui G. Kron și anume: neținînd seama de interconexiunea reală a părților I și II, în

studiul separat al părților, consideră legăturile de interconexiune ca fiind puse în scurtcircuit. Astfel, partea I din figura 9 este văzută de G. Kron în studiul separat, așa cum este indicat în figura 10, adică partea I are 4 ochiuri independente, în loc de 5. De aici rezultatele eronate în cazul unui număr de interconexiuni mai mare ca doi.

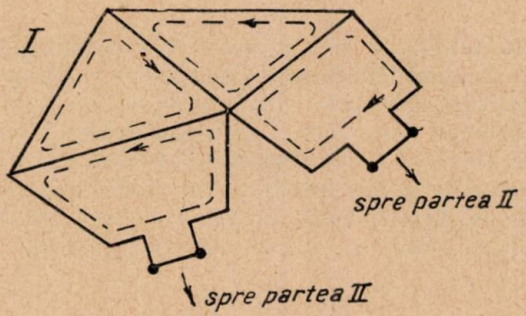



Fig. 10

Esențial în domonstrația dată de noi este că în studiul unei părți se ține seama de influența celeilalte.

În felul acesta matricea de conexiune $\| C \|$ este univocă pentru o interconexiune dată.

În concluzie, în acest studiu s-a arătat că aplicarea calculului matricial în studiul rețelelor electrice complexe, așa cum a fost făcut de G. Kron conține o serie de scăpări, unele de mai mică importanță, alte capitale. În studiu s-a indicat de asemenea cum se pot repara aceste scăpări.

## НЕСКОЛЬКО УТОЧНЕНИЙ В СВЯЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ Г. КРОНОМ МАТРИЧНОГО РАСЧЕТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

(КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

В настоящей работе автор делает несколько критических замечаний относительно применения Г. Кроном матричного расчета для исследования электрических сетей.

Указывается, что введение первичных сетей является натяжкой, не имеющей физического обоснования, которая при обобщении (взаимосвязи нескольких электрических сетей) приводила к ошибочным результатам. Автор, не прибегая к первичным сетям, приводит новое доказательство применимости метода матричного расчета сетей, дающего конкретные результаты и при распространении его на множественные взаимосвязи.

# QUELQUES PRÉCISIONS SUR L'APPLICATION PAR G. KRON DU CALCUL MATRICIEL À L'ÉTUDE DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES COMPLEXES

(RÉSUMÉ)

L'auteur fait quelques remarques critiques au sujet de l'application par G. Kron du calcul matriciel à l'étude des réseaux électriques.

Il montre que l'introduction des réseaux primitifs n'est qu'un artifice — dénué de fondement physique — qui, généralisé à l'interconnexion de plusieurs réseaux, conduit à des résultats erronés. L'auteur présente une nouvelle démonstration de la méthode du calcul matriciel des réseaux, qui ne fait pas appel aux réseaux primitifs et qui, par extension, donne des résultats justes dans le cas des interconnexions multiples aussi.

BIBLIOGRAFIE

1. G. Kron, *Tensor Analysis of Networks*. New York, 1939.
2. — *A Short Course in Tensor Analysis for Electrical Engineers*. New York, 1942.
3. A. E. Meerovici, Elektricestvo, 1947, nr. 2, p. 30.
4. N. E. Maksimovici, Elektricestvo, 1952, nr. 11, p. 52.
5. A. Augot, *Compléments de mathématiques*. Paris, 1949.
6. I. S. Antoniu, *Introducere în aplicarea calculului matricial la studiul circuitelor electrice*. Ed. Acad. R. P. R., Bucureşti, 1953.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 4, 1956

*ELECTROENERGETICĂ ŞI ELECTROTEHNICĂ*

# O TEOREMĂ ÎN STUDIUL REŢELELOR ELECTRICE PRIN CALCUL MATRICIAL*)

DE

C. I. MOCANU

## 1. PROBLEMA

Studiul reţelelor electrice cu ajutorul calculului matricial, conceput de G. Kron, deşi aplică premise eronate, conduce totuşi la soluţia finală exactă. S-a relevat în numeroase lucrări lipsa de noutate a metodei şi a transformării lipsită de sens a reţelei primitive.

În această lucrare, o primă parte dintr-o teorie generală a structurilor electrice pe considerente topologice, autorul şi-a propus :

— să stabilească sistemul corect al ecuaţiilor matriciale fundamentale, sub forma cea mai generală, valabile pentru structurile electrice cu elemente fixe şi mobile — suprimînd final nu numai reţeaua primitivă, ci şi reţeaua ochiurilor Maxwell ;

— să fundamenteze studiul reţelelor electrice pe consideraţiuni de geometrie a spaţiilor $n$ dimensionale ;

— să formuleze o metodă efectivă de calcul, bazată pe o reţea mai simplă — reţeaua redusă a ochiurilor independente ;

— să stabilească o formă tipică a metodei prin procedee de normare a tensorului impedanţelor.

## 2. FORMA ACTUALĂ A METODEI MATRICIALE

Conform metodei matriciale a lui G. Kron, o reţea electrică este caracterizată complet din punct de vedere electromagnetic, prin trei entităţi fizice : vectorul forţelor electromotoare $[E]$, vectorul curenţilor

*) Lucrare prezentată Institutului de energetică la data de 15 martie 1956.

electrici $[I]$ și tensorul impedanțelor $[Z]$. Pentru o rețea electrică liniară, disipativă și simetrică :

$$\overline{Z}_{ik} = \overline{Z}_{ki},$$

în care se presupun cunoscute forțele electromotoare din fiecare element și impedanțele $\overline{Z}_{ii}, \overline{Z}_{ik}$ :

$$\overline{Z}_{ii} = pL_{ii} + R + \frac{1}{pC_{ii}},$$

valorile curenților prin elementele rețelei, se obțin dintr-un sistem de ecuații, stabilit prin transformări liniare, aplicate rețelei date.

Prima ecuație constă în deconectarea elementelor la noduri și legarea lor în scurtcircuit, constituind un sistem de ochiuri distincte, denumită rețea primitivă. Rețeaua primitivă are proprietatea că, deși diferă de rețeaua dată, păstrează aceleași valori ale forțelor electromotoare, curenților și impedanțelor. Ecuația de funcționare a rețelei primitive, exprimată matricial, este ecuația lui Ohm :

$$[E] = [Z]\ [I]. \tag{1}$$

Dintre toate transformările posibile $[C^n]$, autorul alege o anumită transformare $[C]$, pe care o stabilește pe baza teoremelor lui Kirchhoff, din relațiile care definesc dependența liniară a curenților rețelei date, față de curenții aleși ca liniari independenți :

$$[I] = [C]\ [I']. \tag{2}$$

Prin transformarea $[C]$, a cărei matrice denumită matrice de conexiune — în general singulară —, rețeaua primitivă se transformă în rețeaua ochiurilor independente Maxwell, în care vectorii forță electromotoare $[E']$, curent $[I']$, și tensorul impedanțelor $[Z']$, sînt legați de asemenea prin ecuația lui Ohm :

$$[E'] = [Z']\ [I']. \tag{3}$$

Regulile de transformare a mărimilor $[E]$,$[I]$, $[Z]$ se obțin de autor postulînd invarianța puterii :

$$[E]_t\ [I] = [E']_t\ [I'] \tag{4}$$

prin ecuațiile de transformare

$$[E'] = [C]_t\ [E] \cdot \cdot \cdot [Z'] = [C]_t\ [Z]\ [C]. \tag{5}$$

Din ecuația (3), se determină vectorul $[I']$, care introdus în (2) rezolvă rețeaua dată

$$[I'] = [Z']^{-1}\ [E'] \tag{6}$$

și deci

$$[I] = [C]\ [Z']^{-1}\ [E']. \tag{7}$$

În fond, metoda matricială, enunțată și limitată în acest mod, este metoda clasică a curenților ciclici independenți. Ecuația (3) reprezintă condensat ecuațiile ce descriu rețeaua ochiurilor lui Maxwell. Astfel pe linia $i$, a matricilor

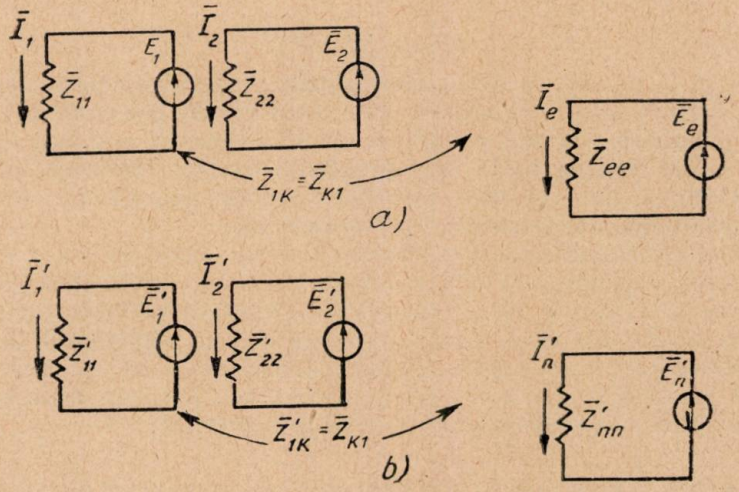



Fig. 1.

*a*) rețeaua primitivă; *b*) rețeaua ochiurilor independente Maxwell.

$$\bar{E}_i = \sum_{ik} \bar{Z}'_{ik} \bar{I}'_k \tag{8}$$

unde $\bar{E}'_i$ este forța electromotoare în ochiul $i$, $\bar{I}'_k$, curentul din ochiul $k$, iar $\bar{Z}'_{ik}$, impedanța între ochiul $i$ și $k$ :

$$\bar{Z}'_{ik} = pL'_{ik} + R_{ik} + \frac{1}{pC'_{ik}}. \tag{9}$$

Metoda prezintă avantajul că, datorită proprietății de ordonare a matricilor, oferă sistemul de ecuații (3), precis și comod, mai ales pentru structurile electrice cu impedanțe mutuale $Z_{ik}$ — deși, chiar și pentru aceste rețele, ecuațiile pot fi stabilite fără a folosi calculul matricial. Metoda matricială este în acest caz, o metodă de stabilire, sub o formă uneori mai comodă, a ecuațiilor ochiurilor rețelei.

Deși ecuațiile (3), (6) și (7) determină corect valorile curenților rețelei, trebuie făcute următoarele observații :

*a*) sistemul de ecuații (1) conduce la afirmația că pentru fiecare element din rețeaua primitivă, forța electromotoare este egală cu suma căderilor de tensiune adică :

$$\bar{E}_i = \sum_{ik} \bar{Z}_{ik} \bar{I}_k$$

ceea ce este evident eronat. Dacă pentru fiecare element în parte, ecuația (1) nu este verificată, rezultă că nici în ansamblu, sub formă condensată, nu e verificată, adică

$$\overline{E}_i \neq \sum_{ik} \overline{Z}_{ik}\, \overline{I}_k$$

și deci

$$[E] \neq [Z]\ [I];$$

*b*) rețeaua primitivă apare deci inutilă. Autorul a folosit construcția rețelei primitive spre a justifica, prin suprimarea tensiunilor la noduri (rețeaua primitivă neavînd noduri nu are nici tensiuni nodale), invarianța legii lui Ohm, pentru toate transformările liniare. Păstrînd invarianța legii lui Ohm, se pune la baza metodei o ecuație greșită (1), motivată de rețeaua primitivă, de asemenea fără semnificație;

*c*) ecuațiile transformării vectorilor forțelor electromotoare, curenților și tensorului impedanțelor (6), se obțin pe baza conservării puterii, la trecerea de la o rețea la alta. Procedeul se bazează pe identitatea a două forme pătratice, din care numai expresia puterii sistemului de ochiuri este restrînsă la forma inerțială. Mai trebuie observat că, deși calculul matricial permite o tipizare a interconexiunilor, autorul stabilește greșit interconectarea prin conductoare a rețelelor electrice.

### 3. ECUAȚIILE MATRICIALE FUNDAMENTALE ALE STRUCTURILOR ELECTRICE

Pentru stabilirea corectă a ecuațiilor matriciale fundamentale ale rețelelor electrice, se vor formula aceste ecuații sub forma generală, pentru structuri electrice cu elemente fixe și mobile.

a. *Prima ecuație matricială a structurilor electrice.* Fie structura electrică $R$, compusă din elemente $\overline{Z}_{kk}$, constituite din rezistoare $R_{kk}$, inductivități proprii și mutuale $L_{kk}$, $L_{ki}$, capacități proprii și mutuale $C_{kk}$, $C_{ki}$, și în care elementul $k$ are viteza $\overline{v}_k$, față de un sistem de referință. În structura dată, avînd $n$ conexiuni conductoare (noduri esențiale), $l$ elemente și $s$ subrețele, aplicînd legea inducției electromagnetice elementului de ordin $k$, rezultă

$$e_{ik} = -\frac{d\varphi_k}{dt} = \oint_l \overline{E}\, \overline{dl} \tag{10}$$

în care s-a notat cu:

$e_{ik}$, forța electromotoare indusă;

$\varphi_k$, fluxul magnetic pentru elementul $k$, iar ultimul termen reprezintă circulația cîmpului electric.

Pentru conturul închis, definit, de elementul $k$, și o linie de contare a tensiunii la bornele $ab$ ale elementului, circulația cîmpului electric va fi dată de

$$\oint_l \overline{E}\, \overline{dl} = R_{kk}\, i_k + \frac{1}{C_{kk}} \int i_k\, dt + u_{bk} - e_k \tag{11}$$

în care $e_k$ este sursa elementului $k$.

Forța electromotoare indusă, obținută din legea inducției electromagnetice, se exprimă prin doi termeni — componenta statică sau de pulsație $e_{isk}$, și componenta de mișcare $e_{imk}$, adică

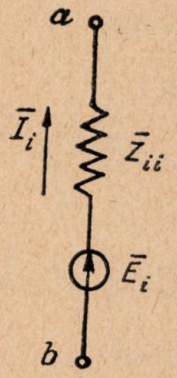



Fig. 2. — Elementul mobil $K$ al rețelei electrice $R$.

$$e_{ik} = e_{isk} + e_{imk} = -\frac{d\varphi_k}{dt} = -\frac{d}{dt}\left(\sum_i^l \varphi_{ki}\right) \tag{12}$$

sau

$$e_{ik} = -\sum_i^l \left[\int_{s\Gamma k} \frac{\partial \bar{b}_{ki}}{\partial t}\, d\bar{A}_k + \oint_{\Gamma k} (\bar{b}_{ki} \times \bar{v}_k)\, d\bar{S}_k\right] \tag{13}$$

în care s-a notat cu :

$\bar{b}_{ki}$, inducția magnetică creată de curentul din circuitul $i$, ce intervine în fluxul magnetic ce străbate circuitul elementului $K$ ;

$d\bar{A}_k$, elementul de suprafață ce sprijină pe conturul $k$ al elementului $K$ ;

$d\bar{s}_k$, elementul de contur $\Gamma_k$.

În cele ce urmează se va exprima tensiunea electrică $e_{ik}$ , în funcție de inductivități sub forma

$$e_{ik} = -\frac{d}{dt}\left(\sum_i^l L_{ki}\, i_i\right) = -\sum_i^l L_{ki}\frac{\partial i_i}{\partial t} - \sum_i^l i_i \frac{\partial L_{ki}}{\partial t} \tag{14}$$

sau, folosind operatorul $p$,

$$E_{ik} = -\sum_i^l L_{ki}\, pi_i - \sum_i^l i_i\, pL_{ki}. \tag{15}$$

Identificînd, din (13) și (15), termenii de indici $k$, din componentele statică și de mișcare rezultă

$$L_{ski} = -\frac{1}{pi_i}\int_{s\Gamma k} \frac{\partial \bar{B}_{ki}}{\partial t}\, d\bar{A}_k, \tag{16}$$

$$pL_{mki} = -\frac{1}{i_i}\oint (\bar{B}_{ki} \times \bar{v}_k)\, d\bar{S}_k = \frac{1}{i_i}\oint (\bar{v}_k \times \bar{B}_{ki})\, d\bar{S}_k\,. \tag{17}$$

Inductivitatea statică se mai poate scrie sub forma

$$L_{ski} = -\frac{1}{pi_i}\int_{s\Gamma k} \frac{\partial \bar{B}_{ki}}{\partial i_i}\frac{\partial i_i}{\partial t}\, d\bar{A}_k = -\frac{1}{pi_i}\int_{s\Gamma k} \frac{\partial \bar{B}_{ki}}{\partial i_i}\, pi_i\, d\bar{A}_k$$

sau

$$L_{ski} = -\int_{s\Gamma k} \frac{\partial \bar{B}_{ki}}{\partial i_i}\, d\bar{A}_k\,. \tag{18}$$

Inductivitatea $L_{sik}$, este;

$$L_{sik} = -\int_{s\Gamma i} \frac{\partial \overline{B}_{ik}}{\partial i_k} d\overline{A}_i. \tag{19}$$

Inductivitatea de mișcare se poate exprima însă sub forma;

$$pL_{mki} = -\frac{1}{i_i} \oint_{\Gamma k} \oint_{\Gamma i} \frac{\mu i_i}{R_{ik}^2} \left[ (d\overline{s}_i \times \overline{U}_{ik}) \times \overline{v}_k \right] d\overline{s}_k =$$

$$= -\oint_{\Gamma i} \oint_{\Gamma k} \frac{\mu}{R_{ik}^2} \left[ d\overline{s}_k \times (d\overline{s}_i \times \overline{U}_{ik}) \right] \overline{v}_k$$

și

$$pL_{mik} = -\oint_{\Gamma i} \oint_{\Gamma k} \frac{\mu}{R_{ik}^2} \left[ d\overline{s}_i \times (d\overline{s}_k \times \overline{U}_{ik}) \right] \overline{v}_i, \tag{20}$$

În elementul $K$, căderea de tensiune va fi dată de expresia

$$\overline{E}_k - \overline{U}_k = \overline{R}_{kk} \overline{I}_k + \frac{1}{C_{kk}p} \overline{I}_k + \sum_i^l (L_{ski}\, p + p\, L_{mki})\, \overline{I}_i =$$

$$= (R_{kk} + \frac{1}{C_{kk}p} + L_{skk}p)\, \overline{I}_k + \sum_i^l (L_{ski}p + pL_{mki})\, \overline{I}_i \tag{21}$$

în care însumarea în ultimul termen se face numai pentru $i \neq k$. Dacă se notează cu $Z_{kk}$, impedanța proprie și cu $\overline{Z}_{ki}$, impedanța mutuală:

$$\overline{Z}_{kk} = R_{kk} + \frac{1}{C_{kk}p} + L_{skk}p \tag{22}$$

și

$$\overline{Z}_{ki} = L_{ski}\, p + p\, L_{mki} \tag{23}$$

ecuația (21) devine

$$\overline{E}_k - \overline{U}_k = \overline{Z}_{k1} \overline{I}_1 + \overline{Z}_{k2} \overline{I}_2 + \ldots + \overline{Z}_{kk} \overline{I}_k + \ldots + \overline{Z}_{kl} \overline{I}_l \tag{24}$$

sau sub formă condensată

$$[E] - [U] = [Z]\ [I] \tag{25}$$

în care în general pentru rețele cu părți rotative și amplificatori:

$$\overline{Z}_{ik} \neq \overline{Z}_{ki}. \tag{26}$$

Ecuația matricială (25) reprezintă prima ecuație matricială a structurilor electrice.

b. *Componentele matricei* $[Z]$. Matricea impedanțelor $[Z]$ se poate scrie sub forma

$$[Z] = [R] + [L_s]\, p + \left[\frac{1}{c}\right] \frac{1}{p} + p\, [L_m] \tag{27}$$

în care

$$[R] = \begin{bmatrix} \bar{R}_{11} & & & & & & \\ & \bar{R}_{22} & & & & & \\ & & \bar{R}_{33} & & & & \\ & & & \ddots & & & \\ & & & & \bar{R}_{kk} & & \\ & & & & & \ddots & \\ & & & & & & \bar{R}_{ll} \end{bmatrix} \tag{28}$$

este matricea rezistențelor,

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{s11} & L_{s12} & L_{s13} & \dots & L_{s1k} & \dots & L_{s1l} \\ L_{s21} & L_{s22} & L_{s23} & \dots & L_{s2k} & \dots & L_{s2l} \\ L_{s31} & L_{s32} & L_{s33} & \dots & L_{s3k} & \dots & L_{s3l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{sk1} & L_{sk2} & L_{sk3} & \dots & L_{skk} & \dots & L_{skl} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{sl1} & L_{sl2} & L_{sl3} & \dots & L_{slk} & \dots & L_{sll} \end{bmatrix} \tag{29}$$

matricea inductivităților statice,

$$\left[\frac{1}{C}\right] = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_{11}} & & & & & & \\ & \frac{1}{C_{22}} & & & & & \\ & & \frac{1}{C_{33}} & & & & \\ & & & \ddots & & & \\ & & & & \frac{1}{C_{kk}} & & \\ & & & & & \ddots & \\ & & & & & & \frac{1}{C_{ll}} \end{bmatrix} \tag{30}$$

matricea capacităților proprii, iar,

$$[L_m] = \begin{bmatrix} L_{m11} & L_{m12} & L_{m13} & \dots & L_{m1k} & \dots & L_{m1l} \\ L_{m21} & L_{m22} & L_{m23} & \dots & L_{m2k} & \dots & L_{m2l} \\ L_{m31} & L_{m32} & L_{m33} & \dots & L_{m3k} & \dots & L_{m3l} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{mk1} & L_{mk2} & L_{mk3} & \dots & L_{mkk} & \dots & L_{mkl} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{ml1} & L_{ml2} & L_{ml3} & \dots & L_{mlk} & \dots & L_{mll} \end{bmatrix} \tag{31}$$

este matricea inductivităților de mișcare. Termenii primei diagonale a matricei $[L_m]$ sînt diferiți de zero pentru elemente cu inductivități proprii variabile (în particular, cu contur deformabil).

Ecuația matricială (25) se poate exprima și sub forma

$$[E] - [U] = ([Z_s] + [Z_m])\,[I] \tag{32}$$

în care $[Z_s]$ este matricea impedanțelor statice :

$$[Z_s] = [R] + [L_s]\,p + \left[\frac{1}{c}\right]\frac{1}{p} \tag{33}$$

iar $[Z_m]$ matricea impedanțelor mutuale :

$$[Z_m] = p\ [L_m]. \tag{34}$$

Ecuația matricială (25) sau (32), s-a stabilit pe baza teoremei căderilor de tensiune Kirchhoff, și poate fi numită „ecuația matricială fundamentală a căderilor de tensiune".

c. *A doua ecuație matricială, ecuația conexiunilor.* Prima ecuație matricială a structurilor electrice nu afirmă nimic în ceea ce privește conexiunile elementelor. Elementele structurilor electrice pot fi interconectate electric — conexiunea electrică prin noduri, sau magnetic. Conform primei ecuații matriciale, sistemul celor $l$ curenți constituie un sistem de mărimi liniar independente. Numai conexiunile (electrice sau magnetice) reduc numărul lor, stabilind relații de dependența liniară. Din sistemul celor $l$ curenți din rețea, o parte sînt dependenți, valorile lor rezultînd din sistemul ecuațiilor de conexiune electrică sau magnetică.

Primul grup al ecuațiilor de dependență liniară, privind conexiunile electrice, se obține din aplicarea primei teoreme Kirchhoff la $(n_e - 1)$ noduri esențiale :

$$\Sigma\ \varepsilon_i\ \bar{I}_i = 0\ \therefore\ i = 1,\ 2,\ 3,\ \dots\ l \tag{35}$$

în care $\varepsilon_i$ are valorile : $-1, 0, +1$, și aplicat de $(n_e - 1)$ ori.

Dacă se notează cu $n_m$ numărul conexiunilor magnetice, aplicînd prima teoremă Kirchhoff celor $n_m$ noduri magnetice, se obține sistemul de ecuații :

$$\Sigma\ \varphi_i = 0\ , \tag{36}$$

în care s-a presupus că structura electrică este liniară, fără histerezis și fără pierderi Foucault. Sistemul celor $n_m$ ecuații din (36) devine

$$\Sigma\ w_i I_i = 0. \tag{37}$$

Pentru structura considerată cu $l$ elemente, numai

$$l - [(n_e - 1) + n_m] \tag{38}$$

curenți sînt liniar independenți. În subrețeaua de rang $K$, numai

$$l_k - [(n_{ek} - 1) + n_{mk}] \tag{39}$$

curenți sînt liniar independenți, iar pentru întreaga structură în care:

$$\Sigma\ l_k = l;\ \Sigma\ n_{ek} = n_e\ ;\ \Sigma\ n_{mk} = n_m\ , \tag{40}$$

numărul total al curenților liniar independenți va fi:

$$\Sigma\ [l_k - ((n_{ek} - 1) + n_{mk})] = l - n + S \tag{41}$$

în care s-a notat cu $n$ numărul total al conexiunilor electrice și magnetice. Dacă din (37), se scriu $n$ ecuații ale conexiunilor magnetice și din (36), $(n - S)$ ecuații ale conexiunilor electrice, se obține sistemul de: $n_e + n_m - S$, ecuații:

$$\begin{aligned} n_m &\left\{ \begin{array}{l} w_1 \bar{I}_1 + w_2 I_2 + \ldots + w_i \bar{I}_i = 0 \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ w_d \bar{I}_d + w_f \bar{I}_f + \ldots + w_k \bar{I}_k = 0 \end{array} \right. \\ n_e - S &\left\{ \begin{array}{l} \bar{I}_1 - \bar{I}_2 + \ldots + \bar{I}_i = 0 \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \bar{I}_e - \bar{I}_f + \ldots + \bar{I}_k = 0\ . \end{array} \right. \end{aligned} \tag{42}$$

Dacă se aleg din cei $l$ curenți, arbitrar, un număr de curenți ca liniar independenți, și se exprimă curenții din elementele rețelei în funcție de aceștia, se obține sistemul

$$\begin{aligned} n_m &\left\{ \begin{array}{l} \bar{I}_1 = -\Sigma \dfrac{w_k}{w_1} \bar{I}_k \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ \bar{I}_d = -\Sigma \dfrac{w_k}{w_f} \bar{I}_k \end{array} \right. \\ n_e - S &\left\{ \begin{array}{l} \bar{I}_i = \Sigma\ \varepsilon_k \bar{I}_k \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ \bar{I}_j = \Sigma\ \varepsilon_k I_k \end{array} \right. \end{aligned} \tag{43}$$

Completînd cu curenții aleși ca liniar independenți, sistemul (43) se exprimă matricial

$$[I] = [C]\ [I'] \tag{44}$$

în care $[I]$ este matricea curenților rețelei, de ordin $l$, $[I']$ matricea curenților liniar independenți de ordin : $p = 1 - n + S$, și $[C]$ matricea de conexiune de formă dreptunghiulară cu $l$ linii și $n$ coloane. Termenii matricei $[C]$ sînt : -1,0, + 1, referitor la conexiunile electrice, și $-\frac{w_k}{w_a}$, referitor la conexiunile magnetice.

Ecuația matricială (44), obținută din aplicarea primei teoreme Kirchhoff conexiunilor electrice și magnetice, este „ecuația matricială fundamentală a conexiunilor".

Ecuațiile (25) și (44) reprezintă sistemul de ecuații matriciale fundamentale, definind funcționarea structurilor electrice.

### 4. ECUAȚIILE TRANSFORMĂRII ÎN REȚEAUA OCHIURILOR (MAXWELL)

Trecerea la sistemul ochiurilor Maxwell, $R'$, se poate realiza pe baza transformărilor liniare, fără a folosi invarianța puterii, în două moduri.

Din punct de vedere al algebrei liniare, ecuația (25) reprezintă sistemul funcțiilor liniare $[E] - [U]$, față de vectorul $[I]$. La schimbarea bazei de referință, dacă $[C]$ este matricea prin care se exprimă componentele în noul sistem $[I']$, atunci, în noua bază, funcția liniară $[E' - U']$ se obține cu transpusa matricei $[C]_t$ adică

$$[E' - U'] = [C]_t [E - U] \tag{45}$$

sau

$$[E'] - [U'] = [C]_t [E] - [C]_t [U].$$

Multiplicînd (25) cu $[C]_t$ rezultă

$$[C]_t [E] - [C]_t [U] = [C]_t [Z] [I]$$

și înlocuind pe $[I]$ din (44) :

$$[C]_t [E] - [C]_t [U] = [C]_t [Z] [I] = [C]_t [Z] [C] [I']$$

sau

$$[E'] - [U'] = [Z'] [I'] \tag{46}$$

în care

$$[Z'] = [C]_t [Z] [C]. \tag{47}$$

În rețeaua curenților independenți (rezultînd din suprimarea nodurilor), tensiunile nodale sînt nule :

$$[U'] = [C]_t [U] = 0$$

adică

$$[E'] = [C]_t [E - U] = [C]_t [E]. \tag{48}$$

Ecuația (46) devine

$$[E'] = [Z'] [I']. \tag{49}$$

Din punct de vedere tensorial, ecuațiile transformării se obțin observînd că mărimile $[E]$, $[I]$ și $[Z]$ fiind definite în spațiul euclidian, se pot alege arbitrar componentele covariante sau contravariante. Vectorii $[E]$ și $[I]$ trebuie aleși conform ecuației (25), cu variante opuse, iar tensorul $[Z]$ este dublu variant cu ambele variante, opuse variantei vectorului curent. Dacă de exemplu se alege vectorul $[I]$ contravariant, vectorii $[E]$ $[U]$ trebuie să fie covarianți și tensorul $[Z]$ dublu covariant. Ecuațiile de transformare rămîn aceleași, dacă se alege vectorul $[I]$ covariant $[E]$, $[U]$ contravarianți, iar tensorul $[Z]$ dublu contravariant.

Introducerea calculului matricial în acest mod, în studiul rețelelor electrice are avantajul evident, al stabilirii corecte a ecuațiilor matriciale fundamentale, înlătură ecuația eronată (1), și suprimă construcția artificială a rețelei primitive.

*Aplicație.* Ecuațiile matriciale fundamentale ale transformatorului. Fie transformatorul cu $w_1$, $w_2$ spire, cu $\overline{U}_{b1}$, $\overline{U}_{b2}$, $\overline{E}_1$, $E_2$, $\overline{I}_1$, $\overline{I}_2$, $\overline{I}_{10}$, tensiunile la borne, forțele electromotoare și curenții. Ecuațiile de funcționare a transformatorului sînt:

$$\begin{aligned} &w_1 \overline{I}_1 + w_2 \overline{I}_2 = w_1 \overline{I}_{10}, \\ &\overline{U}_{b1} = -\overline{E}_1 + R_1 \overline{I}_1 + j X_{1s} \overline{I}_1 = -\overline{E}_1 + \overline{Z}_1 \overline{I}_1, \\ &\overline{E}_2 = \overline{U}_{b2} + R_2 \overline{I}_2 + j X_{2s} \overline{I}_2 = \overline{U}_{b2} + \overline{Z}_2 \overline{I}_2. \end{aligned} \tag{50}$$

Sistemul ecuațiilor liniare (50) poate fi scris sub formă

$$\begin{aligned} 0 &= w_1 \overline{I}_{10} - w_1 \overline{I}_1 - w_2 \overline{I}_2 \\ \overline{E}_1 + \overline{U}_{b1} &= \overline{Z}_1 \overline{I}_1 \\ \overline{E}_2 - \overline{U}_{b2} &= \overline{Z}_2 \overline{I}_2 \end{aligned} \tag{51}$$

adică matricial

$$[E] - [U_b] = [Z]\ [I] \tag{52}$$

în care matricele $[E]$, $[U_b]$, $[Z]$, și $[I]$ au formele

$$[E] = \begin{bmatrix} 0 \\ \overline{E}_1 \\ \overline{E}_2 \end{bmatrix} \quad [U_b] \begin{bmatrix} 0 \\ -U_{b1} \\ U_{b2} \end{bmatrix}; \quad [I] = \begin{bmatrix} \overline{I}_{10} \\ \overline{I}_1 \\ \overline{I}_2 \end{bmatrix}; \quad [Z] = \begin{bmatrix} w_1 & -w_2 & -w_2 \\ 0 & \overline{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \overline{Z}_2 \end{bmatrix}.$$

A doua ecuație matricială a transformatorului, se va stabili în așa fel, încît ecuația amperspirelor din (52) să se transforme în ecuația conexiunilor electrice a primei teoreme Kirchhoff:

$$\overline{I}_1 + \frac{w_2}{w_1} \overline{I}_2 = \overline{I}_1 + \overline{I}'_2 = \overline{I}_{10}, \tag{53}$$

în care s-a notat

$$\overline{I}'_2 = \frac{w_2}{w_1} \overline{I}_2 = \frac{1}{k} \overline{I}_2.$$

Pentru prezentarea matricială, se va scrie sistemul curenților sub forma

$$\begin{aligned} \bar{I}_{10} &= \bar{I}_{10} \\ \bar{I}_1 &= \bar{I}_1' \\ \bar{I}_2 &= \frac{w_1}{w_2}\bar{I}_2' \end{aligned}$$

sau condensat

$$[I] = [C]\,[I'] \tag{54}$$

în care matricele curentului $[I']$ și de conexiune $[C]$ sînt de forma

$$[I'] = \begin{bmatrix} \bar{I}_{10} \\ \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2' \end{bmatrix} \quad \therefore \quad [C] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & K \end{bmatrix}. \tag{55}$$

Matricea de conexiune $[C]$, (55) e fără defect (nesingulară).

Ecuațiile matriciale (52) și (54) sînt ecuațiile fundamentale ale transformatorului. Să transformăm acum aceste ecuații utilizînd funcționala $[C]$. Matricele forțelor electromotoare, tensiunilor și a impedanțelor se transformă după :

$$[E'] = [C]_t\,[E] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{E}_1 \\ \bar{E}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{E}_1 \\ K\bar{E}_2 \end{bmatrix}$$

$$[U_b'] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -U_{c1} \\ U_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -U_{c1} \\ KU_{c2} \end{bmatrix}$$

$$[Z'] = [C]_t\,[Z]\,[C] = [C]\,[Z]\,[C] = \begin{bmatrix} w_1 & -w_1 & -w_1 \\ 0 & \bar{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & K^2\bar{Z}_2 \end{bmatrix}.$$

Ecuația matricială transformată, după ce s-a simplificat cu $w_1$, are forma

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \bar{E}_1 \\ K\bar{E}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{U}_{c1} \\ KU_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & \bar{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & K^2\bar{Z}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{10} \\ \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2' \end{bmatrix}$$

sau condensat

$$[E'] - [U_b'] = [Z']\,[I']. \tag{56}$$

Ecuația matricială (56) reprezintă însă schema echivalentă în $T$ a transformatorului. Ecuațiile matriciale fundamentale ale transformatorului enunțate sub forma (52) și (54) și datorită formei matricei de conexiune $[C]$, permit transformarea directă a mărimilor raportate, fără presupuneri de invarianță a căderilor procentuale de tensiune, a puterilor etc.

## 5. METODA REȚELEI REDUSE A SISTEMULUI DE OCHIURI INDEPENDENTE

(Matricea diagonală a impedanțelor)

Chiar și în această formă de introducere a calculului matricial în studiul rețelelor electrice, avantajul metodei se reduce la posibilitatea stabilirii rapide a sistemului de ecuații a ochiurilor : ea nu permite o ușurare a calculului. Determinarea curenților din ecuația (7) pretinde calcularea inversei matricei $[Z']$, operație cu atît mai dificilă, cu cît ordinul matricei este mai mare. Pentru o rețea complexă cu impedanțe mutuale între toate elementele, matricea $[Z']$ are toți termenii $Z'_{ik} \neq 0$. Calculul matricei inverse $[Z']^{-1}$, de ordinul $n$, cere în general calcularea determinantului : $\Delta_m = |Z'|$, de ordinul $n$ și $n^2$, minorii $\Delta_{ik}$ de ordinul $(n-1)$, corespunzînd fiecărui termen $Z'_{ik}$, operație obositoare, pentru un număr mare de ochiuri.

Calculul inversei matricei $[Z']^{-1}$, este însă o operație mult mai simplă, dacă $[Z']$ are forma diagonală, sau poate fi adusă prin procedee simple la această formă. Dacă matricea tensorului impedanțelor are forma di gonală, inversa se obține înlocuind termenii primei diagonale cu inverșii lor. În afară de ușurința determinării lui $[Z']^{-1}$, matricea diagonală prezintă și avantajul simplificării operațiilor de înmulțire, de ridicare la putere, de transpunere etc. Introducînd inversa matricei diagonale a impedanțelor în (7), curenții rețelei date se pot citi imediat.

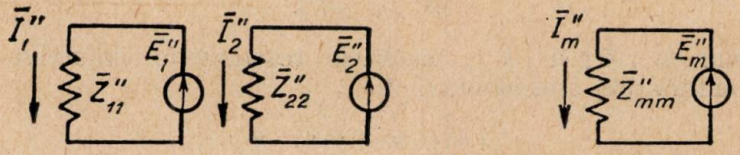



Fig. 3. — Rețeaua redusă a ochiurilor independente $R''$.

Din punct de vedere al calculului, metoda implică găsirea transformării simple, care să permită trecerea de la ecuația (49) la ecuația

$$[E''] = [Z''] \; [I''] \tag{57}$$

în care $[Z'']$, este o matrice diagonală de rang $m \ll n$.

Din punct de vedere topologic, sistemul de ecuații (57), exprimat desfășurat, are forma

$$\begin{aligned}
\bar{E}''_1 &= \bar{Z}''_{11}\,\bar{I}''_1, \\
\bar{E}''_2 &= \quad\; Z''_{22}\,\bar{I}''_2, \\
&\cdots\cdots\cdots\cdots \\
\bar{E}''_k &= \qquad\quad \bar{Z}''_{kk}\,\bar{I}''_k, \\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\
\bar{E}''_n &= \qquad\qquad \bar{Z}''_n\,\bar{I}''_n.
\end{aligned}$$

El reprezintă ecuațiile unui sistem de ochiuri independente, nu numai electric ci și magnetic : $\bar{Z}''_{ik} = 0$. Sistemul (57) reprezintă $m$ generatoare

de forță electromotoare $[E'']$ și impedanță proprie nulă, debitînd distinct pe $m$ impedanțe $\overline{Z}''_{kk}$, străbătute de curenții $\overline{I}''_{kk}$. Vom numi rețeaua redusă $R''$, rețeaua sistemului de ochiuri independente. Dacă $[C]$ este matricea de transformare a rețelei date $R$, în rețeaua ochiurilor Maxwell $R'$, și $[C_{\diagdown}]$ a rețelei $R'$, în rețeaua redusă $R''$, se poate găsi transformarea directă $[C'']$, cu ajutorul căreia să se transforme direct rețeaua $R$ în $R''$ fără a mai trece prin rețeaua intermediară $R'$. Transformarea definită de matricea $[C'']$, ar permite direct obținerea ecuației (57) din (25). Problema se reduce deci la determinarea matricei $[C'']$, care transformă rețeaua dată $R$, în rețeaua redusă $R''$.

### 6. TRANSFORMAREA MATRICEI $[Z']$ ÎN MATRICEA DIAGONALĂ $[Z'']$

Procedeul clasic de transformare a unei matrice, la forma diagonală, constă în determinarea valorilor proprii și raportarea matricei date la vectorii direcțiilor proprii. În acest caz, matricea $[Z']$ ar trebui să fie de formă hermitică :

$$\overline{Z}_{ik} = \overline{Z}^{*}_{ki} . \tag{58}$$

Condiția (58) nu este îndeplinită de matricele impedanțelor, și este echivalentă cu

$$[Z'] = [R']. \tag{59}$$

Notînd cu $[X'_i]$ și $[X'_c]$, matricele reactanțelor inductive și capacitive, condiția (59) este identică cu

$$[X'_i] = [X'_c] = 0 \tag{60}$$

sau

$$[X'_i] = [X'_c]. \tag{61}$$

Rețelele electrice îndeplinind condiția (59), sau (60), și (61) sînt constituite fie din elemente rezistive, fie rețele integral compensate (în care puterea reactiv inductivă totală este egală cu puterea reactiv capacitivă din rețea).

În general, inconvenientul aducerii matricei $[Z']$ la forma diagonală, constă în postularea pe care o face algebra liniară, pretinzînd ca produsele scalare în complex, să aibă valori reale, motivat în fond de valoarea indiscutabil reală pe care trebuie să o ia norma unui vector :

$$(x,\ y)_{x=y} = (x,\ x) = \sum_{i}^{n} x_i\ x_i^{*} = \sum_{i}^{n} |\ x_i\ |^2 .$$

Se poate însă proceda altfel.

Dacă se multiplică în rețeaua $R$, ecuația matricială (25) prin $[I]_t$ și se observă că matricele $[I]_t$ și $[U]$ sînt divizori ai lui zero :

$$[I]_t\ [U] = 0, \tag{62}$$

se obține

$$[I]_t\,[E] = [I]_t\,[Z]\,[I] \tag{63}$$

reprezentînd în complex, bilanțul puterilor aparente produse în rețea de sursele $\overline{E}_j$, respectiv consumate de impedanțele $\overline{Z}_{jj}$, $\overline{Z}_{jk}$. Primul membru al ecuației (63) reprezintă produsul scalar al vectorilor $[E]$ și $[I]$ pe care îl vom nota prin $(E,\ I)$, reținînd ca în complex, produsul scalar operează cu valorile complex conjugate ale celui de al doilea vector, $[I]$:

$$(E,\ I) = \sum_{j}^{t} \overline{E}_j\,\overline{I}_j^{\star}. \tag{64}$$

În ce privește al doilea membru al ecuației (63), exprimat desfășurat:

$$\sum_{jk}^{l} \overline{Z}_{jk}\,\overline{I}_j\,\overline{I}_k^{\star}$$

se poate reprezenta ținînd seamă de (25) și (62), sub forma produsului scalar

$$\sum_{jk}^{l} \overline{Z}_{jk}\,\overline{I}_j\,\overline{I}_k^{\star} = (U + ZI, I) = (U, I) + (ZI, I) = (ZI, I) \tag{65}$$

adică

$$(E,\ I) = (Z\ I,\ I). \tag{66}$$

Identitatea (66) exprimă corespondența biunivocă între forma biliniară $(E,\ I)$ a puterii produse și forma pătratică $(ZI,\ I)$ a puterii consumate.

Reprezentînd analog și în rețeaua $R'$, a ochiurilor Maxwell, puterile ca produse scalare, rezultă:

$$(E',\ I') = (Z'\ I',\ I') \tag{67}$$

în care

$$(E',\ I') = \sum_{j}^{n} \overline{E}_j'\,\overline{I}_j'^{\star} \quad \therefore \quad (Z'\ I',\ I') = \sum_{jk}^{n} \overline{Z}_{jk}'\,\overline{I}_j'\,\overline{I}_k'^{\star}). \tag{68}$$

Conservarea puterilor în cele două rețele, rezultă implicit din invarianța produselor scalare:

$$(E,\ I) \equiv (E',\ I') \quad \therefore \quad (Z\ I,\ I,\ ) \equiv (Z'I',\ I'). \tag{69}$$

Față de forma pătratică $(ZI,\ I)$ a rețelei $R$, forma $(Z'I',\ I')$ a rețelei $R'$ are avantajul că este restrînsă la forma inerțială Sylvester, adică la forma, cu numărul minim de termeni — indiferent dacă e sau nu pozitiv definită. În acest caz se poate aplica formei patratice a rețelei $R'$, o

teoremă a transformărilor liniare, care stabilește corespondența biunivocă

$$(Z'I',\ I') = Z'\,(I',\ I'). \tag{70}$$

Identitatea(70), afirmă că pentru o rețea electrică $R$, avînd $n$ ochiuri, oricărei forme pătratice $(Z'I',\ I')$, îi corespunde forma biliniară $Z'\,(I',\ I')$, definită de funcționala $Z'$. Riguros cele două matrice $[Z']$ din ecuația (70), sînt una transpusă celeilalte, confundate însă pentru rețelele electrice simetrice, $(\overline{Z}'_{jk} = \overline{Z}'_{kj})$.

Dacă matricea $[Z']$ se exprimă sub forma

$$[Z'] = [R'] + j\ [X'] \tag{71}$$

forma pătratica $(Z'I,\ I')$ se exprimă astfel :

$$(Z'I',\ I') = \sum_{jk}^{n} R'_{jk}\,\overline{I}'_j\,\overline{I}'^{*}_k + j \sum_{jk}^{n} X'_{jk}\,\overline{I}'_j\,\overline{I}'^{*}_k\ . \tag{72}$$

Termenul $\sum_{jk}^{n} R'_{jk}\,\overline{I}'_j\,\overline{I}'^{*}_k$ este puterea activă, iar $\sum_{jk}^{n} X'_{jk}\,\overline{I}'_j\,\overline{I}'^{*}_k$ puterea reactivă. Matricele $[R']$ și $[X']$ sînt hermitice, iar formele pătratice respective, reductibile la sume de patrate :

$$R'\,(I',\ I') = \sum_{jk}^{n} R'_{jk}\,\overline{I}'_j\,\overline{I}'^{*}_k = \sum_{jj}^{n} R''_{jj}\,\overline{I}''^{2}_j \tag{73}$$

$$X'\,(I',\ I') = \sum_{jk}^{n} X'_{jk}\,\overline{I}'_j\,\overline{I}'^{*}_k = \sum_{jj}^{n} X''_{jj}\,I''^{2}_j \tag{74}$$

din care forma patratică (73) este pozitiv definită, termenii $R''_{jj}$ fiind pozitivi. Se poate găsi o bază de referință în care ambele forme să fie aduse simultan ca expresii canonice jordaniene. Noile matrici $[R'']$ și $[X'']$ vor fi de forma

$$[R''] = \begin{bmatrix} 1 & & & & & & \\ & 1 & & & & & \\ & & 1 & & & & \\ & & & \cdot & & & \\ & & & & \cdot & & \\ & & & & & 1 & \\ & & & & & & \cdot \\ & & & & & & & \cdot \\ & & & & & & & & 1 \end{bmatrix} \qquad [X''] = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & & & & \\ & \lambda_2 & & & & & \\ & & \lambda_3 & & & & \\ & & & \cdot & & & \\ & & & & \cdot & & \\ & & & & & \lambda_j & \\ & & & & & & \cdot \\ & & & & & & & \cdot \\ & & & & & & & & \lambda_n \end{bmatrix} \tag{75}$$

Termenii $X_{jj} = \lambda_j$ sînt rădăcinile ecuației caracteristice

$$\begin{bmatrix} \lambda R'_{11} - X'_{11}, & \lambda R'_{12} - X'_{12}, \ldots & \lambda R'_{1j} - X'_{1j}, \ldots & \lambda R'_{1n} - X'_{1n} \\ \lambda R'_{21} - X'_{21}, & \lambda R'_{22} - X'_{22}, \ldots & \lambda R'_{2j} - X'_{2j}, \ldots & \lambda R'_{2n} - X'_{2n} \\ \ldots\ldots & \ldots\ldots & \ldots\ldots & \ldots\ldots \\ \lambda R'_{j1} - X'_{j1}, & \lambda R'_{j2} - X'_{j2}, \ldots & \lambda R'_{jj} - X'_{jj}, \ldots & \lambda R'_{jn} - X'_{jn} \\ \ldots\ldots & \ldots\ldots & \ldots\ldots & \ldots\ldots \\ \lambda R'_{n1} - X'_{n1}, & \lambda R'_{n2} - X'_{n2}, \ldots & \lambda R'_{nj} - X'_{nj}, \ldots & \lambda R'_{nn} - X'_{nn} \end{bmatrix} = 0$$

care reprezintă ecuația seculară a celor două forme pătratice. Soluționarea ecuației seculare, determinarea vectorilor proprii etc. presupune operații complicate, care depășesc cu mult dificultățile determinării matricei inverse. Procedeul trebuie abandonat.

### 7. METODA FORMELOR PĂTRATICE PENTRU ADUCEREA MATRICEI SIMETRICE [Z'] LA FORMA DIAGONALĂ [Z'']

În fond procedeul pe care îl vom expune este o nouă metodă de rezolvare a sistemelor de ecuații liniare bazată pe metoda clasică a formelor pătratice Jacobi. Multiplicînd cu $j$ ecuația (74) și adunînd cu (73) se obține

$$R'(I', I') + jX'(I', I') = Z'(I', I') \tag{76}$$

și deci

$$R''(I'', I'') + jX''(I'', I'') = Z''(I'', I''). \tag{77}$$

Însumarea celor două forme pătratice $R''(I'', I'')$ și $X''(I'', I'')$ din care cea de a doua multiplicată cu $j$, înseamnă renunțarea la postularea normării la valori reale a produselor scalare, în scopul operării cu matricea $[Z'']$, diagonală și complexă.

Fie $[f]$ sistemul vectorilor de bază ales ca sistem de referință ortogonal, pentru curentul $[I']$. Vom numi acest vector „vectorul impulsiilor unitare", față de care, curentul $[I']$, se reprezintă sub forma :

$$[I'] = I'_1 \bar{f}_1 + I'_2 \bar{f}_2 + \ldots + I'_k \bar{f}_k + \ldots + I'_n \bar{f}_n \tag{78}$$

și în care

$$\begin{aligned} \bar{f}_1 &= (1, 0, 0, \ldots, 0, \ldots, 0), \\ \bar{f}_2 &= (0, 1, 0, \ldots, 0, \ldots, 0), \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \bar{f}_k &= (0, 0, 0, \ldots, 1, \ldots, 0), \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \bar{f}_n &= (0, 0, 0, \ldots .0, \ldots, 1). \end{aligned}$$

Forma patratică

$$\sum_{i}^{n} \overline{E}_i \overline{I}_i^{\star} = \sum_{i}^{n} \overline{Z}_{ik} \overline{I}_i \overline{I}_k^{\star} \tag{79}$$

are loc în baza $[f]$. Vom transforma această bază treptat astfel încît, succesiv, să dispară din expresia (79) a formei pătratice produsele componentelor de indici diferiți.

Reducerea formei pătratice (79), prin acest procedeu, pretinde ca cel puțin unul din coeficienții $\overline{Z}_{kk}$ să fie diferit de zero. În rețele de curent continuu toți coeficienții $R_{kk}$ sînt diferiți de zero, în curenți alternativi pot fi nuli (rețele cu toate ochiurile Maxwell în rezonanță).

În acest caz se alege un produs distinct de forma

$$\overline{Z}_{ik} \overline{I}_i \overline{I}_k^{\star} \neq 0 \tag{80}$$

și se face schimbarea de componente

$$\overline{I}_i = \overline{I}_i'' + \overline{I}_k'',$$
$$\overline{I}_k = \overline{I}_i'' - \overline{I}_k''.$$

Termenul (80) se transformă în : $\overline{Z}_{ik} (\overline{I}_i''^2 - \overline{I}_k''^2)$ și deci condiția impusă este realizată în noua bază de referință. Să revenim la forma pătratică (79).

În expresia (79), se poate completa un pătrat perfect :

$$\sum_{ik}^{n} \overline{Z}_{ik} \overline{I}_i \overline{I}_k = \frac{1}{\overline{Z}_{11}} (\overline{Z}_{11n} + \ldots + \overline{Z}_{1n} \overline{I}_n)^2 - B \tag{81}$$

în care s-a notat cu $B$ termenii care conțin numai pătratele și produsele două cîte două ale lui : $\overline{Z}_{12} \overline{I}_2, \ldots, \overline{Z}_{1n} \overline{I}_n$

Făcînd schimbarea de componente :

$$\begin{aligned}
\overline{I}_1^{(1)} &= \overline{Z}_{11} \overline{I}_1 + \overline{Z}_{12} \overline{I}_2 + \ldots + \overline{Z}_{1i} \overline{I}_i + \ldots + \overline{Z}_{1n} \overline{I}_n \\
\overline{I}_2^{(1)} &= \overline{I}_2 \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
\overline{I}_i^{(1)} &= \ldots \quad \ldots \overline{I}_i \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
\overline{I}_n^{(1)} &= \ldots \quad \ldots \overline{I}_n
\end{aligned} \tag{82}$$

rezultă

$$\sum_{ik}^{n} \overline{Z}_{ik} \overline{I}_i \overline{I}_k = Z' (I', I') = \frac{1}{\overline{Z}_{11}} (\overline{I}_1^{(1)})^2 + \sum_{ik=2}^{n} \overline{Z}_{ik}^{(1)} \overline{I}_i^{(1)} \overline{I}_k^{(1)}. \tag{83}$$

Ultimul termen din expresia (83) este analog cu (79), și permite completarea unui pătrat perfect conținînd termeni exclusiv $\overline{I}_1^{(1)}$, astfel încît

printr-o transformare similară cu (82):

$$\begin{aligned}
&\bar{I}_1^{(2)} = I_1^{(1)} \\
&\bar{I}_2^{(2)} = \quad \bar{Z}_{22}^{(1)} I_2^{(1)} + \bar{Z}_{23}^{(1)} I_3^{(1)} + \ldots + \bar{Z}_{2i}^{(1)} I_i^{(1)} + \ldots + \bar{Z}_{2n}^{(1)} \bar{I}_n^{(1)} \\
&\bar{I}_3^{(2)} = \ldots \qquad \ldots \; I_3^{(1)} \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
&\bar{I}_i^{(2)} = \ldots \qquad\qquad \ldots \; I_i^{(1)} \\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
&I_n^{(2)} = \ldots \qquad\qquad\qquad\qquad \ldots \; I_n^{(1)}
\end{aligned} \tag{84}$$

forma patratică se transformă mai departe

$$Z'(I', I') = \frac{1}{\bar{Z}'_{11}} (\bar{I}_1^{(2)})^2 + \frac{1}{\bar{Z}_{22}^{(1)}} (I_2^{(2)})^2 + \sum_{ik=3}^{n} \bar{Z}_{ik}^{(2)} \bar{I}_i^{(2)} \bar{I}_k^{(2)} . \tag{85}$$

Efectuînd $n$ transformări similare se ajunge în cele din urmă la o sumă de pătrate:

$$Z'(I', I') = \bar{Z}''_{11} \bar{I}''^2_1 + \bar{Z}''_{22} I''^2_2 + \ldots + \bar{Z}''_{ii} I''^2_i + \ldots + \bar{Z}''_{nn} I''^2_n \tag{86}$$

Toate transformările elementare de tipul $[D^{(K)}]$, (84), care transformă final vectorul curent $[I']$ în vectorul curent $[I'']$, se pot exprima prin grupul $[D_{\triangle}]$:

$$[I''] = [D^{(0)}]\,[D^{(1)}]\,[D^{(2)}] \ldots [D^{(k)}] \ldots [D^{(n-1)}]\,[I'] \tag{87}$$

în care

$$[D_{\triangle}] = \prod_{k=0}^{n-1} [D^{(k)}]. \tag{88}$$

În grupul transformărilor liniare $[D_{\triangle}]$, transformarea elementară $[D^{(k)}]$ este de forma

$$[D^{(k)}] = \begin{bmatrix}
1 & & & & & & & & & \\
& 1 & & & & & & & & \\
& & \cdot & & & & & & & \\
& & & \cdot & & & & & & \\
& & & & \cdot & & & & & \\
& & & & & 1 & & & & \\
& & & & & & \bar{Z}^{(k)}_{k-1,k-1} & \bar{Z}^{(k)}_{k-1,k} & \ldots & \bar{Z}^{(k)}_{k-1,l} \\
& & & & & & 1 & & & \\
& & & & & & & \cdot & & \\
& & & & & & & & \cdot & \\
& & & & & & & & & 1 \\
& & & & & & & & & & 1
\end{bmatrix} \tag{89}$$

astfel încît matricea $[D_\triangle]$ are forma triunghiulară :

$$\begin{aligned}
\bar{I}_1'' &= \bar{d}_{11}\bar{I}_1' + \bar{d}_{12}\bar{I}_2' + \bar{d}_{13}\bar{I}_3' + \ldots + \bar{d}_{1i}\bar{I}_i' + \ldots + \bar{d}_{1n}\bar{I}_n',\\
\bar{I}_2'' &= \ldots\ \bar{d}_{22}\bar{I}_2' + \bar{d}_{23}\bar{I}_3' + \ldots + \bar{d}_{2i}\bar{I}_i' + \ldots + \bar{d}_{2n}\bar{I}_n',\\
\bar{I}_3'' &= \ldots\quad \ldots\ \bar{d}_{33}\bar{I}_3' + \ldots + \bar{d}_{3i}\bar{I}_i' + \ldots\ \bar{d}_{3n}\bar{I}_n',\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
\bar{I}_i'' &= \ldots\quad \ldots\quad \ldots\ \bar{d}_{ii}\bar{I}_i' + \ldots + \bar{d}_{in}\bar{I}_n',\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
\bar{I}_n'' &= \ldots\quad \ldots\quad \ldots\quad \ldots\ \bar{d}_{nn}\bar{I}_n'.
\end{aligned} \tag{90}$$

Simultan cu transformarea vectorului curent $[I']$ în $[I'']$, s-a transformat și sistemul impulsiilor unitare $[f]$ în $[F]$. Deoarece matricea care definește transformarea componentelor vectorului $[I']$, se obține prin inversa matricei transpusă de transformare a bazei ; rezultă că noul sistem al impulsiilor unitare $[F]$, se obține din $[f]$, după sistemul

$$\begin{aligned}
\bar{F}_1 &= \bar{C}_{11}\bar{f}_1,\\
\bar{F}_2 &= \bar{C}_{21}\bar{f}_1 + \bar{C}_{22}\bar{f}_2,\\
\bar{F}_3 &= \bar{C}_{31}\bar{f}_1 + \bar{C}_{22}\bar{f}_2 + \bar{C}_{33}\bar{f}_3,\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
\bar{F}_i &= \bar{C}_{i1}\bar{f}_1 + \bar{C}_{i2}\bar{f}_2 + \bar{C}_{i3}\bar{f}_3 + \ldots + \bar{C}_{ii}\bar{f}_i,\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
\bar{F}_n &= \bar{C}_{n1}\bar{f}_1 + \bar{C}_{n2}\bar{f}_2 + \bar{C}_{n3}\bar{f}_3 + \ldots + \bar{C}_{ni}\bar{f}_i + \ldots + \bar{C}_{nn}\bar{f}_n
\end{aligned} \tag{91}$$

sau condensat :

$$[F] = [C_\triangle]\,[f] \tag{92}$$

în care matricea $[C_\triangle]$ este de asemenea triunghiulară.

Între matricele

$$[D_\triangle] = \begin{bmatrix}
\bar{d}_{11} & \bar{d}_{12} & \bar{d}_{13} & \ldots & \bar{d}_{1i} & \ldots & \bar{d}_{1n}\\
 & \bar{d}_{22} & \bar{d}_{23} & \ldots & \bar{d}_{2i} & \ldots & \bar{d}_{2n}\\
 & & \bar{d}_{33} & \ldots & \bar{d}_{3i} & \ldots & \bar{d}_{3n}\\
 & & & & \ldots & & \\
 & & & & \bar{d}_{ii} & \ldots & \bar{d}_{in}\\
 & & & & & & \ldots\\
 & & & & & & \bar{d}_{nn}
\end{bmatrix} \quad \therefore\ [C_\triangle] = \begin{bmatrix}
\bar{C}_{11} & & & & & & \\
\bar{C}_{21} & \bar{C}_{22} & & & & & \\
\bar{C}_{31} & \bar{C}_{32} & \bar{C}_{33} & & & & \\
\ldots & \ldots & \ldots & & & & \\
\bar{C}_{i1} & \bar{C}_{i2} & \bar{C}_{i3} & \ldots & \bar{C}_{ii} & & \\
\ldots & \ldots & \ldots & & \ldots & & \\
\bar{C}_{n1} & \bar{C}_{n2} & \bar{C}_{n3} & \ldots & \bar{C}_{ni} & \ldots & \bar{C}_{nn}
\end{bmatrix} \tag{93}$$

există relația

$$[D_\triangle] = [C_\triangle]^{-1}. \tag{94}$$

### 8. DETERMINAREA MATRICEI TRANSFORMĂRII $[C_{\triangle}]$

Deoarece transformarea grup $[D_{\triangle}]$ rezultă ca produs al transformărilor elementare $[D^{(k)}]$, evident că și matricea $[C_{\triangle}]$ poate fi considerată ca grup al transformărilor elementare $[C^{(k)}]$

$$[C_{\Delta}] = [C^{(0)}]\,[C^{(1)}]\,[C^{(2)}] \ldots [C^{(k)}] \ldots [C^{(n-1)}] \tag{95}$$

în care fiecare dintre matricele $[C^{(k)}]$ este posibilă dacă sînt îndeplinite în (81), (83) etc. condiții de forma

$$\overline{Z}_{kk}^{(k-1)} \neq 0, \tag{96}$$

ceea ce este ușor de verificat adică : primii minori ai matricei $[Z']$ să fie diferiți de zero

$$\Delta_{11} = \overline{Z}'_{11} \neq 0 \ldots \qquad \Delta_{22} = \begin{vmatrix} \overline{Z}'_{11} & \overline{Z}'_{12} \\ \overline{Z}'_{21} & \overline{Z}'_{22} \end{vmatrix}$$

$$\Delta_{kk} = \begin{vmatrix} \overline{Z}'_{11} & \overline{Z}'_{12} & \overline{Z}'_{13} & \ldots & \overline{Z}'_{1k} \\ \overline{Z}'_{21} & \overline{Z}'_{22} & \overline{Z}'_{23} & \ldots & \overline{Z}'_{2k} \\ \overline{Z}'_{31} & \overline{Z}'_{32} & \overline{Z}'_{33} & \ldots & \overline{Z}'_{3k} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \overline{Z}'_{k1} & \overline{Z}'_{k2} & \overline{Z}'_{k3} & \ldots & \overline{Z}'_{kk} \end{vmatrix} \tag{97}$$

pentru $k$ de la 1 la $n$.

În forma pătratică (79), coeficienții $\overline{Z}'_{ik}$ sînt dați, în baza impulsiilor unitare $[f]$, de expresia

$$\overline{Z}'_{ik} = Z'(\overline{f}_i, \overline{f}_k) . \tag{98}$$

Pentru a determina coeficienții $\overline{C}_{ik}$, ai matricei $[C_{\triangle}]$, trebuie găsit noul vector de bază $[\overline{F}]$, în care :

$$\overline{Z}'_{ik} = Z'(\overline{F}_i, \overline{f}_k) = 0 \tag{99}$$

pentru $i \neq k$. Dacă este îndeplinită condiția (99), atunci și :

$$Z(\overline{F}_k, \overline{f}_i) \tag{100}$$

pentru : $1 < i < k - 1$.

Înlocuind în (100), valoarea lui $\overline{F}_k$ din (91), rezultă că determinarea coeficienților : $\overline{C}_{k1}$, $\overline{C}_{k2}$, ... , $\overline{C}_{kk}$, se obține din rezolvarea sistemului

$$\begin{aligned}
&\overline{Z}'_{11}\,\overline{C}_{k1} + \overline{Z}'_{12}\,\overline{C}_{k2} + \overline{Z}'_{13}\,\overline{C}_{k3} + \cdots + \overline{Z}'_{1k}\,\overline{C}_{kk} = 0,\\
&\overline{Z}'_{21}\,\overline{C}_{k1} + \overline{Z}'_{22}\,\overline{C}_{k2} + \overline{Z}'_{23}\,\overline{C}_{k3} + \cdots + \overline{Z}'_{2k}\,\overline{C}_{kk} = 0,\\
&\overline{Z}'_{31}\,\overline{C}_{k1} + \overline{Z}'_{32}\,\overline{C}_{k2} + \overline{Z}'_{33}\,\overline{C}_{k3} + \cdots + \overline{Z}'_{3k}\,\overline{C}_{kk} = 0,\\
&\cdots\cdots\cdots

în care

$$\Delta_{00} = 1 \; ; \; \Delta_{11} = \overline{Z}'_{11} \; ; \; \Delta_{22} = \begin{vmatrix} \overline{Z}'_{11} & \overline{Z}'_{12} \\ \overline{Z}'_{21} & \overline{Z}'_{22} \end{vmatrix} ;$$

$$\Delta_{jj} = \begin{vmatrix} \overline{Z}'_{11} & \overline{Z}'_{12} & \overline{Z}'_{13} & \dots & \overline{Z}'_{1j} \\ \overline{Z}'_{21} & \overline{Z}'_{22} & \overline{Z}'_{23} & \dots & \overline{Z}'_{2j} \\ \overline{Z}'_{31} & \overline{Z}'_{32} & \overline{Z}'_{32} & \dots & \overline{Z}'_{3j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \overline{Z}'_{j1} & \overline{Z}'_{j2} & \overline{Z}'_{j3} & \dots & \overline{Z}'_{jj} \end{vmatrix} \tag{104}$$

se obține :

$$\overline{Z}''_{11} = \frac{\Delta_{00}}{\Delta_{11}} \; ; \; \overline{Z}''_{22} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta_{22}} \; ; \dots \overline{Z}''_{jj} = \frac{\Delta_{j-1,\,j-1}}{\Delta_{jj}} \dots \overline{Z}''_{nn} = \frac{\Delta_{n-1,\,n-1}}{\Delta_{nn}} \tag{105}$$

Termenii matricei triunghiulare $[C_{\diagdown}]$ se obțin din sistemul de ecuații normale (101), din relația de recurență :

$$\overline{C}_{ji} = (2\,\delta_{ji} - 1)\,\frac{\Delta_{j-1,j}}{\Delta_{jj}} \tag{106}$$

în care s-a notat cu

$\delta_{ji}$, simbolul Kronecker, egal cu 1 pentru $i = j$, și nul pentru $i \neq j$ ;

$\Delta_{jj}$, primul minor de ordinul $j$ al matricei $[\overline{Z}']$,

$\Delta_{j-1,\,i}$, primul minor de ordinul $j - 1$, în care s-a suprimat colcana și s-a înlocuit cu coloana $j$.

De exemplu

$$\overline{C}_{31} = -\frac{\begin{vmatrix} \overline{Z}'_{13} & \overline{Z}'_{12} \\ \overline{Z}'_{23} & \overline{Z}'_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \overline{Z}'_{11} & \overline{Z}'_{12} & \overline{Z}'_{13} \\ \overline{Z}'_{21} & \overline{Z}'_{22} & \overline{Z}'_{23} \\ \overline{Z}'_{31} & \overline{Z}'_{32} & \overline{Z}'_{33} \end{vmatrix}} .$$

Se observă că relația de recurență (106) generalizează pe (102) :

$$\overline{Z}''_{jj} = \overline{C}_{jj} . \tag{107}$$

### 10. TRANSFORMAREA DIRECTĂ A REȚELEI $R$ ÎN REȚEAUA REDUSĂ $R''$

Matricea $[D_{\diagdown}]$ care definește schimbarea sistemului de referință este nesingulară și de asemenea matricea $[C_{\diagdown}]$. Conform ecuației (87), matricea

$[C_\triangle]_t^{-1}$ transformă vectorul $[I']$ în $[I'']$, și deci vectorul $[E']$ în $[E'']$, după inversa transpusei:

$$[E''] = ([C_\triangle]_t^{-1})_t^{-1}\,[E'],$$
$$[E''] = [C_\triangle]\,[E']. \tag{108}$$

Pentru rețelele $R$, $R'$, $R''$, ecuațiile fundamentale și de transformare sînt:

— În rețeaua $R$:

$$[E] - [U] = [Z]\,[I], \tag{109}$$
$$[I] = [C]\,[I']; \tag{110}$$

— În rețeaua $R'$:

$$[E'] = [C]_t\,[E], \tag{111}$$
$$[Z'] = [C]_t\,[Z]\,[C], \tag{112}$$
$$[E'] = [Z']\,[I']; \tag{113}$$

— În rețeaua $R''$:

$$[I''] = [C_\triangle]_t^{-1}\,[I'], \tag{114}$$
$$[E''] = [C_\triangle]\,[E'], \tag{115}$$
$$[Z''] = [C_\triangle]\,[Z']\,[C_\triangle],]_t, \tag{116}$$
$$[E''] = [Z'']\,[I'']. \tag{117}$$

Dacă se înlocuiesc valorile rețelei $R'$ din (115), (116), (117), se obține transformarea directă de la $R$ la $R''$:

$$[I] = ([C]\,[C_\triangle]_t)\,[I'']. \tag{118}$$
$$[E''] = ([C_\triangle]\,[C]_t)\,[E] = ([C]\,[C_\triangle]_t)_t\,[E]. \tag{119}$$
$$[Z''] = ([C_\triangle]\,[C]_t)\,[Z]\,([C]\,[C_\triangle]_t) = ([C]\,[C_\triangle]_t)_t\,[Z]\,([C]\,[C_\triangle]_t) \tag{120}$$

Dacă produsul matricilor $[C]$ și $[C_\triangle]_t$ se notează cu $[C']$:

$$[C'] = [C]\,[C_\triangle]_t \tag{121}$$

sistemul ecuațiilor de transformare în rețeaua redusă va fi

$$[I] = [C']\,[I''], \tag{122}$$
$$[E''] = [C']_t\,[E], \tag{123}$$
$$[Z''] = [C']_t\,[Z]\,[C]. \tag{124}$$

Din (117) rezultă

$$[I''] = [Z'']^{-1}[E''] \tag{125}$$

care înlocuită în (122), determină vectorul curent $[I]$ al rețelei:

$$[I] = [C']\,[Z'']^{-1}\,[E'']. \tag{126}$$

și în care matricea $[Z'']$ e de forma

$$[Z'']^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\bar{Z}''_{11}} & & & & \\ & \frac{1}{\bar{Z}''_{22}} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \frac{1}{\bar{Z}''_{jj}} & \\ & & & & \ddots \\ & & & & & \frac{1}{\bar{Z}''_{nn}} \end{bmatrix} \tag{127}$$

## 11. TEOREMA DESCOMPUNERII UNEI REȚELE ELECTRICE $R$ ÎN SISTEMUL DE CIRCUITE INDEPENDENTE $R''$

Orice rețea electrică $R$ având $l$ elemente și $p$ noduri se poate descompune printr-o transformare liniar-triunghiulară în: $n = l - p + 1$ circuite independente (în care $\bar{Z}_{ik} = 0$ — rețeaua redusă $R''$).

*Aplicație.* Spre a se exemplifica aplicarea metodei, să considerăm rețeaua constituită din două generatoare, de forțe electromotoare $\bar{E}_1$, $\bar{E}_2$ și de impedanțe $\bar{Z}_1$, $\bar{Z}_2$, debitînd pe impedanța $\bar{Z}_3$. Se aleg curenții independenți $\bar{I}_1$ și $\bar{I}_2$. Matricele $[C]$, $[E]$ și $[I]$ sînt date de:

$$\left.\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 &= \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 &= \bar{I}_1 + \bar{I}_2 \end{aligned}\right\} \quad \therefore \quad [C] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \therefore \quad [E] = \begin{bmatrix} \bar{E}_1 \\ \bar{E}_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \therefore \quad [I] = \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix}.$$

Matricele $[Z']$ și $[C_\Delta]$ sînt:

$$[Z'] = \begin{bmatrix} \bar{Z}_1 + \bar{Z}_3, & \bar{Z}_3 \\ \bar{Z}_3 & , \quad \bar{Z}_2 + \bar{Z}_3 \end{bmatrix} \quad \therefore \quad [C_\Delta] = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & 0 \\ \bar{C}_{21} & \bar{C}_{22} \end{bmatrix}$$

în care

$$\bar{C}_{11} = \bar{Z}''_{11} = \frac{1}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_3} \quad \therefore \quad C_{21} = -\frac{\bar{Z}_3}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_2\bar{Z}_3 + \bar{Z}_3\bar{Z}_1} \quad \therefore \quad \bar{C}_{22} = \bar{Z}''_{22} =$$

$$= \frac{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_3}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_2\bar{Z}_3 + \bar{Z}_3\bar{Z}_1}.$$

Matricele $[E'']$ și $[I]$ au expresiile :

$$[E''] = \begin{bmatrix} \dfrac{\bar{E}_1}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_3} \\ \dfrac{-\bar{Z}_3\bar{E}_1 + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_3)\bar{E}_2}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_2\bar{Z}_3 + \bar{Z}_3\bar{Z}_1} \end{bmatrix} \quad [I] = \begin{bmatrix} \dfrac{(\bar{Z}_2 + \bar{Z}_3)\bar{E}_1 - \bar{Z}_3\bar{E}_2}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_2\bar{Z}_3 + \bar{Z}_3\bar{Z}_1} \\ \dfrac{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_3)\bar{E}_2 - \bar{Z}_3\bar{E}_1}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_2\bar{Z}_3 + \bar{Z}_3\bar{Z}_1} \\ \dfrac{\bar{Z}_2\bar{E}_1 + \bar{Z}_1\bar{E}_2}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + \bar{Z}_2\bar{Z}_3 + \bar{Z}_3\bar{Z}_1} \end{bmatrix}.$$

Evident avantajele simplificării calculelor sînt remarcabile pentru rețele cu număr mare de ochiuri.

## 12. FORMA TIPICĂ A REȚELEI REDUSE

Transformarea liniară definită de matricea $[C']$, transformă rețeaua dată $R$, în sistemul ochiurilor independente $R''$, în care ochiul $j$ are impedanța $\bar{Z}''_{jj}$, curentul $\bar{I}''_j$ și forța electromotoare $\bar{E}''_j$. Valorile $Z''_{jj}$ depind de matricea $[Z']$ și deci de matricea de conexiune $[C]$. Cu o matrice de conexiune diferită, vor rezulta valori diferite pentru impedanțele rețelei reduse $R''$. Conservarea puterii cedate de sursele $\bar{E}''_j$, și a puterii consumate de impedanțele $Z''_{jj}$ :

$$\sum_j^n \bar{E}''_j \bar{I}''^{*}_j = \sum_j^n \bar{Z}''_{jj} \bar{I}''^2_j \tag{128}$$

permite ca printr-o transformare ortogonală, forma p tratică $Z''$ $(I'', I'')$ să se reducă la forma normată a vectorilor de curent și forță electromotoare, iar matricea tensorului impedanțelor se reduce la unitate Aplicînd transformarea

$$\bar{I}'''_j = \bar{Z}''^{\frac{1}{2}}_{jj} \bar{I}''_j \tag{129}$$

sau matricial

$$[I'''] = [Z'']^{\frac{1}{2}} [I''] \tag{130}$$

matricele $[E'']$, $[I'']$ se transformă după expresia

$$[E'''] = [Z'']_t^{-\frac{1}{2}} [E''] = [Z'']^{-\frac{1}{2}} [E''] \tag{131}$$

$$[I'''] = [Z'']_t^{-\frac{1}{2}} [Z''] [Z'']^{-\frac{1}{2}} = [1]. \tag{132}$$

Ecuația lui Ohm se va scrie

$$[E'''] = [I'''] \tag{133}$$

Rețeaua redusă a ochiurilor independente, avînd impedanțele $\bar{Z}''_{jj}$, s-a transformat într-un sistem de ochiuri, de asemenea independente, dar cu impedanțe egale cu unitatea. Introducînd valoarea lui $I''_j$ din (130) în (126), se obține

$$[I] = [C'] [Z'']^{-\frac{1}{2}} [I'''] = [C''] [I'''] \tag{134}$$

în care

$$[C''] = [C'] [Z'']^{-\frac{1}{2}}. \tag{135}$$

### 13. TEOREMA DESCOMPUNERII UNEI REȚELE ELECTRICE $R$, ÎN SISTEMUL DE CIRCUITE INDEPENDENTE CU IMPEDANȚE UNITARE

Orice rețea electrică $R$ se poate descompune într-un sistem de circuite independente, avînd impedanțe egale cu unitatea — rețeaua redusă la forma

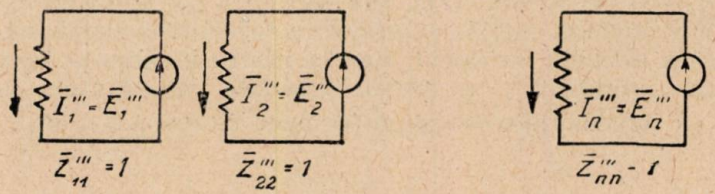



Fig. 4. — Rețeaua electrică redusă la forma tipică.

tipică, $R'''$, trebuie menționat că dacă în transformarea ortogonala (130) se operează cu matricea complexă $[Z'']$, se obține pentru tensorul impedanțelor $[Z''']$ în rețeaua $R'''$ o matrice unitară [1], reală. Dacă se operează cu matricea modulelor $[|Z''|]$, atunci se obține pentru tensorul impedanțelor $[Z''']$, o matrice complexă, $[e^{j\varphi'''}]$, de asemenea diagonală.

### 14. REȚEAUA FUNDAMENTALĂ $R^\circ$

Înlocuind valoarea vectorului de forță electromotoare $[R'']$, din (123) ecuația (124), se poate exprima astfel

$$[I] = [C'] [Z'']^{-1} [C']_t [E] \tag{136}$$

Dacă se notează cu $[Y^\circ]$ produsul matricilor

$$[Y^\circ] = [C'] [Z'']^{-1} [C']_t \tag{137}$$

ecuația (136) devine

$$[I] = [Y^\circ] [E]. \tag{138}$$

Ecuația (138) reprezintă legea lui Ohm sub formă matricială, în care $[Y^\circ]$ este o matrice de admitanțe, iar $[I]$ și $[E]$ vectorii de curent

și forță electromotoare ai rețelei date. Dezvoltînd după fiecare linie, ecuația (138), rezultă pentru elementul $k$:

$$\bar{I}_k = \sum_{j=1}^{l} \overset{\circ}{\bar{Y}}_{kj} \bar{E}_j \,. \tag{139}$$

Sistemul ecuațiilor liniare (139), reprezintă $l$ ochiuri ale structurii $R$, avînd pe fiecare buclă aceeași forță electromotoare și curent.

Dacă se notează, în ecuația (138), inversul matricei $[Y^\circ]^{-1}$, cu:

$$[Z^\circ] = [Y^\circ]^{-1} \tag{140}$$

ecuația (138) se poate scrie

$$[E] = [Z^\circ]\,[I]. \tag{141}$$

Vom denumi sistemul buclelor corespunzînd ecuației matriciale (141) rețea fundamentală $R^\circ$. Se recunoaște imediat, „asemănarea" între ecuația matricială (141) și ecuația ce definește rețeaua primitivă a lui Kron. În timp ce ecuația matricială (141), este verificată pe fiecare linie, ecuația (1) este algebric eronată. Simpla suprimare a tensiunilor nodale nu o justifică nici chiar ca artificiu de calcul. Spre a păstra invarianța legii lui Ohm, în rețeaua „primitivă", ar trebui înlocuite impedanțele rețelei date $\bar{Z}_{jj}$, $\bar{Z}_{jk}$, cu impedanțele de calcul (evident fictive), $\overset{\circ}{\bar{Z}}_{jj}$, $\overset{\circ}{\bar{Z}}_{jk}$.

## 15. CONCLUZII

Studiul rețelelor electrice pe considerații topologice, prezintă avantagii remarcabile:

*a*) formulează corect ecuațiile matriciale fundamentale ale structurilor electrice, cu conexiuni electrice și magnetice, enunțînd concentrat în matricea de conexiune, ambele conexiuni;

*b*) suprimă rețeaua primitivă, operîndu-se direct cu rețeaua dată;

*c*) teorema rețelei reduse, dezvoltă mai departe șirul transformărilor liniare, aducînd simplificări importante în studiul rețelelor electrice, cu impedanțe simetrice. În timp ce metoda clasică se limitează numai la două transformări: rețeaua primitivă, și rețeaua ochiurilor Maxwell — ambele fictive, — metoda de calcul a rețelei reduse, transformă mai departe rețeaua ochiurilor Maxwell $R'$, în rețeaua redusă $R''$, reală — și pe aceasta în rețeaua redusă la forma tipică $R'''$.

Rețelele reduse $R'$ și $R''$, au proprietăți interesante:

*d*) rețeaua redusă $R'$, reprezintă numărul minim de circuite independente reale, în care prin transformări liniare, se poate descompune rețeaua dată și

*e*) reprezintă numărul maxim de circuite electrice simple cu care se pot realiza prin transformări liniare rețeaua dată;

*f*) e un sistem fizic real și nu o transformare de calcul, simplă. În rețeaua primitivă și sistemul de ochiuri al curenților ciclici se pot găsi ochiuri fără forțe electromotoare, în care curenții sînt motivați de rezistențele de cuplaj

$R'_{jk}$ (evident fictive). Rezistențele buclelor rețelei reduse, îndeplinind condițiile Sylvester ale formelor pătratice pozitiv definite, sînt nenegative;

*g*) rețeaua redusă conservă puterea activă și reactivă. De asemenea conservă din rețeaua Maxwell, $R'$, numărul consumatorilor inductivi, capacitivi și al ochiurilor compensate. În adevăr, forma pătratică a puterii reactive $X'$ $(I', I')$, este restrînsă la forma inerțială Sylvester, și deci numărul termenilor pozitivi, negativi și nuli, sînt invarianți ai transformării. Numărului termenilor pozitivi, îi corespund consumatorii inductivi, celui negativ, consumatorii capacitivi, iar celor nuli, ochiurile compensate;

*h*) metoda rețelei reduse simplifică calculele. În loc de a calcula inversa matricei $[Z']$, care pretinde în general determinarea unui determinant de ordinul $n$ și $n^2$ determinanți de ordin $(n-1)$, metoda rețelei reduse $R''$ cere, pentru calculul matricei triunghiulare $[C_{\triangle}]$, numai $n/2$, determinați de ordinul de la 1 la $n$;

*i*) interpretarea topologică a rețelelor electrice, conduce la formularea izomorfismului structurilor electrice deosebit de importantă. Utilizarea noțiunilor de „structură electrică", „normarea vectorilor de forță electromotoare și curent", urmărește dezvoltarea logică a topologiei spațiilor vectoriale normate. Se știe că prin „structură" în sens larg se înțelege organizarea axiomatică a unei mulțimi abstracte pe baza unei clase de legi de compoziție între elementele aceleiași mulțimi — numită clasa legilor interne și a unei alte clase de legi de compoziție cu elementele altor mulțimi — clasa legilor externe. Analog, structura electrică poate fi interpretată ca sistemul impedanțelor și surselor în interconexiune electrică și magnetică, străbătut de curenții electrici, care alcătuiesc elementele mulțimii de studiat. Legile de compoziție internă se vor exprima în acest caz, prin relațiile de dependență liniară a curenților electrici, adică cea de a doua ecuație fundamentală a rețelelor electrice — ecuația conexiunilor (44). Legea de compoziție externă stabilește legătura dintre elementele spațiului curenților $[I]$ cu elementele spațiilor forțelor electromotoare $[E]$ și a tensiunilor $[U]$ pe baza corpului complex al impedanțelor, $[Z]$, adică" ecuația matricială a căderilor de tensiune „ (25). Analog izomorfismului structurilor în sens larg, izomorfismul structurilor electrice, stabilind o corespondență biunivocă între elementele rețelelor, permite studiul rețelelor electrice complexe pe modele simple.

*Institutul politehnic, București,*
*Catedra „Bazele teoretice ale electrotehnicii 1"*

## ТЕОРЕМА, ВЫТЕКАЮЩАЯ ИЗ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПРИ ПОМОЩИ МАТРИЧНОГО ИСЧИСЛЕНИЯ

### (КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Предложенное Г. Кроном исследование электрических сетей при помощи матричного исчисления, несмотря на применяемые в нем неправильные предпосылки, приводит все же к правильному окончатель-

ному решению. Во многих работах отмечалось отсутствие новизны этого метода, а также и смысла преобразования первичной сети.

В настоящей работе в первой части общей теории электрических структур, основанной на топологических соображениях, автор задался целью установить правильную систему основных матричных уравнений, применяемую в общей форме к электрическим структурам с неподвижными и подвижными элементами, окончательно устранив не только первичную сеть, но и сеть петель Максвелля, обосновать исследование электрических сетей на соображениях, вытекающих из геометрии $n$-мерных пространств; сформулировать эффективный метод расчета, основанный на более простой сети, а именно уменьшенной сети независимых петель, установить типичную форму метода нормирования тензора импедансов.

Исключив первичную сеть, а также неправильное уравнение (1), автор доказывает и устанавливает правильную систему основных матричных уравнений электрических сетей $[E]-[U]=[Z][I]$ и $[I]=[C][I']$.

Но даже и в этой форме введения матричного исчисления в исследование электрических сетей преимущество метода сводится к возможности быстрого и удобного установления системы уравнений петель. Решение матричного уравнения (7) требует вычисления матрицы, обратной матрице $[Z']^{-1}$, что является трудоемкой операцией, когда в сетях большое число петель. Вычисление матрицы $[Z']^{-1}$ упрощается, если матрица тензора импедансов приведена к диагональной форме. С топологической точки зрения приведение матрицы $[Z']$ к диагональной форме влечет за собой преобразование соответствующей сети в систему независимых электрических цепей, то есть в уменьшенную сеть $R''$, в которой $Z''_{ik}=0$, и которая непосредственно решает уравнение (7), устраняя таким образом сеть петель Максвелля.

Классический прием преобразования матрицы $[Z']$ в диагональную форму $[Z'']$, состоящий в определении собственных чисел и отнесении их к собственным векторам, требует сложных расчетов, значительно превосходящих трудности определения обратной матрицы. Главное неудобство состоит в ограничении эрмитовой формы матрицы $[Z']$, которого требует преобразование, и которое осуществляется только сетями с резистивными элементами или компенсированными петлями.

При использовании ограниченной квадратичной формы электрической мощности (72) получается матрица $[C']$ прямого преобразования данной сети $R$ в уменьшенную сеть $R''$. Матрица прямого преобразования $[C']$ дана произведением матрицы соединения на транспонированную треугольной матрицы $[C]$ $[C_\Delta]_t$.

Параметры уменьшенной сети упрощают расчет обратной матрицы. В то время как в методе Крона используются две преобразованные сети — первичная сеть и сеть петель, обе фиктивные, в методе уменьшенной сети используется только одна сеть, реальная, обладающая замечательными свойствами. Теорема уменьшенной сети выявляет параметрический характер тензора импедансов, полностью определяет топологию сети, являясь критерием изоморфизма для линейных электрических структур.

## ОБЪЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1. — $a$ — первичная сеть; $b$ — сеть независимых петель Максвелла.
Рис. 2. — Подвижной элемент $K$ электрической сети $R$.
Рис. 3. — Уменьшенная сеть независиммых петель $R''$.
Рис. 4. — Электрическая сеть, приведенная к типовой форме.

## UN THÉORÈME DANS L'ÉTUDE DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES À L'AIDE DU CALCUL MATRICIEL

(RÉSUMÉ)

Bien que partant de prémisses erronées, l'étude des réseaux électriques à l'aide du calcul matriciel, conçue par Kron, mène à une solution finale exacte. Le manque d'originalité de la méthode et de la transformation, dépourvue de sens, du réseau primitif a été relevé dans de nombreux travaux.

Dans le présent travail, première partie d'une théorie générale des structures électriques basée sur des considérations topologiques l'auteur a tâché d'établir sous une forme générale le système correct des équations matricielles fondamentales, valables pour les structures électriques à éléments fixes et mobiles —en supprimant, pour finir, non seulement le réseau primitif, mais aussi le réseau des mailles de Maxwell. Il a également tenté de baser l'étude des réseaux électriques sur des considérations de la géométrie des espaces à $n$ dimensions ; d'élaborer une méthode efficace de calcul, basée sur un réseau plus simple — le réseau réduit aux mailles indépendantes — ; d'établir, enfin, une forme type de la méthode par des procédés de normer le tenseur des impédances.

En supprimant le réseau primitif, en même temps que l'équation erronée (1), il énonce et établit le système correct des équations matricielles fondamentales des réseaux électriques : $[E] - [U] = [Z]\,[I]$ et $[I] = [C]\,[I']$.

Mais, même en introduisant, sous cette forme, le calcul matriciel dans l'étude des réseaux électriques, l'avantage de la méthode se réduit à la possibilité d'établir d'une manière rapide et commode le système d'équatios des mailles. Pour résoudre l'équation matricielle (7), il faut calculer l'inverse de la matrice $[Z']^{-1}$, opération difficile pour les réseaux ayant un grand nombre de boucles. Le calcul de la matrice $[Z']^{-1}$ est simplifié lorsque la matrice du tenseur des impédances est ramenée, par des procédés simples, à la forme diagonale. Au point de vue topologique, ramener la matrice $[Z']$ à la forme diagonale implique la transformation du réseau considéré en un système de circuits indépendants — le réseau réduit $R''$, où $Z''_{ik} = 0$, qui résout directement l'équation (7), supprimant ainsi en même temps le réseau des mailles (Maxwell).

Le procédé classique pour ramener la matrice $[Z']$ à la forme diagonale $[Z'']$, qui consiste à déterminer les valeurs propres et à les rapporter à leurs directions propres, exige des calculs compliqués, dont les difficultés dépassent de beaucoup celles de la détermination de la matrice inverse. Son principal inconvenient réside dans la restriction de la forme herm tique de la matrice $[Z']$ qu'exige la transformation et qui n'est remplie que par les réseaux à éléments résistifs ou à boucles compensées.

A l'aide de la forme quadratique restreinte de la puissance électrique (72), on obtient la matrice $[C']$ de la trasformation directe du réseau considéré $R$, en réseau réduit $R''$. La matrice $[C']$ de la transformation directe est donnée par le produit $[C'] [C_{\diagdown}]_t$ de la matrice de connexion, par la transposée de la matrice triangulaire.

Les paramètres du réseau réduit simplifient les opérations de calcul de la matrice inverse. Tandis que la méthode de Kron emploie deux réseaux transformés — le réseau primitif et le réseau des mailles — , tous les deux fictifs, la méthode du réseau réduit n'emploie qu'un seul réseau, réel, ayant des propriétés remarquables. Le théorème du réseau réduit fait ressortir le caractère paramétrique du tenseur des impédances et définit complètement la topologie du réseau, en constituant le critérium d'isomorphisme des structures électriques linéaires.

## EXPLICATION DES FIGURES

Fig. 1. — *a)* Réseau primitif. *b)* Réseau de mailles independentes de Maxwell.
Fig. 2. — Elément mobile $K$ du réseau électr que $R$.
Fig. 3. — Réseau réduit des mailles indépendantes $R''$.
Fig. 4. — Réseau électrique réduit à la forme type.

## BIBLIOGRAFIE

1. Ion S. Antoniu, *Introducere în aplicarea calculului matricial la studiul rețelelor electrice* Ed. Acad. R.P.R., București, 1953.
2. G. Kron, *Tensor Analysis of Networks.* New York, 1939.
3. G. Vrănceanu, *La géométrie differentielle,* București. 1947, vol. II.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 4, 1956

*ELECTROENERGETICĂ ŞI ELECTROTEHNICĂ*

# APLICAREA METODEI CONSUMATORULUI UNIC ÎN CERCETAREA STABILITĂŢII DINAMICE A SISTEMELOR ENERGETICE (CU AJUTORUL GRAFICELOR DE SCURTCIRCUIT)*)

DE

P. DIMO

## I. GENERALITĂŢI – PREMISE SIMPLIFICATOARE

Într-un studiu precedent [1] s-a arătat o cale nouă pentru analiza stabilităţii sistemelor energetice denumită „metoda consumatorului unic echivalent" şi care are următoarele avantaje asupra metodelor existente :

1° Permite vizionarea întregului sistem şi aprecierea importanţei fiecărui element în parte din punctul de vedere al stabilităţii.

2° Permite o orientare rapidă asupra variaţiei stabilităţii, în cazul variaţiei unui parametru oarecare al sistemului.

3° Permite găsirea cu cea mai mare uşurinţă, a tensiunii „critice" în fiecare nod al sistemului şi în orice ipoteze de schimbare a sistemului.

4° În sfîrşit, este de o aplicare extrem de uşoară şi rapidă şi nu necesită calcule laborioase sau instrumente speciale (mese de calcul), aşa cum este obişnuit în probleme de stabilitate.

Această metodă utilizează graficele de scurtcircuit, aşa cum se va face şi mai departe. S-au arătat în [1] exemple de aplicare a metodei pentru cercetarea stabilităţii statice. În cele ce urmează vom arăta noi posibilităţi ale acestei metode şi în special aplicarea ei în aprecierea stabilităţii dinamice.

a) *Maşinile sincrone.* Rezumăm mai jos premizele utilizate în metoda propusă în ceea ce priveşte maşinile sincrone :

1) Rotorul maşinilor sincrone este legat rigid de un vector tensiune şi se mişcă o dată cu el.

---

*) Lucrare prezentată Institutului de energetică la data de 5 octombrie 1956.

2) Acest vector tensiune este aplicat unei reactanțe, care este reactanța internă a mașinii.

Aceste două reprezentări ale fenomenului din mașina sincronă sînt în general admise azi, cu toate că sînt destul de departe de realitățile fizice ale fenomenului.

În ceea ce privește caracteristicile statice și dinamice ale mașinii sincrone, se poate observa :

*Caracteristica statică* : Mărimea reactanței interne a mașinii sincrone se consideră aceea corespunzătoare reacției indusului, adică așa denumită „sincronă". Tensiunea constantă internă a mașinii este cea corespunzătoare acestei reactanțe. Astfel, se ține seama implicit de reacțiunea indusului. Acest fel de a proceda a fost utilizat la cercetarea stabilității statice.

*Caracteristica dinamică* : Mărimea reactanței interne în calculele de stabilitate dinamică se consideră reactanța „tranzitorie" care dă rezultate suficient de apropiate de realitate. Tensiunea constantă ce se consideră legată rigid de rotor este cea corespunzătoare acestei reactanțe (tensiunea) care aplicată acestei reactanțe reproduce circulația de curenți și tensiunile.

b) *Sarcinile.* Pentru *sarcini* se poate considera un motor sincron echivalent cu caracteristicile indicate mai sus.

Acest fel de a aproxima sarcinile nu se depărtează prea mult de realitate, dacă în compoziția sarcinii respective s-ar găsi motoare sincrone într-o proporție însemnată.

De obicei, în compoziția sarcinii dominînd motoarele asincrone, în calculele analitice, din imposibilitatea de a face altfel, se echivalează sarcinile cu impedanțe constante. Acest fel de a reprezenta sarcinile fiind în orice caz mai apropiat de realitate pentru fenomenele dinamice, mai ales dacă se presupune pentru motoarele asincrone o alunecare constantă în timpul unei variații bruște. Vom considera pentru sarcini două tipuri diferite de reprezentări, după cum judecăm problemele regimului staționar sau cele ale regimului dinamic și anume :

*regimul de echilibru* staționar al unui sistem se aproximează cu următoarele caracteristici pentru sarcini :

— putere activă $P = \text{const.}$

— putere reactică $Q = y_1 U^2$ ($y_1 = \text{const.}$).

Aceste caracteristici se consideră adevărate pentru deplasări mici ale sistemului în jurul unui punct, deplasări în interiorul cărora nu au lucrat regulatoare, nici cele de tensiune și nici cele de putere, situație caracteristică unei stări de echilibru. Aceste caracteristici au fost utilizate la cercetarea stabilității statice ;

*regimul de dezechilibru*, în care sistemul se deplasează de la o situație la alta, este greu de caracterizat. Vom păstra, pentru acest regim, după cum am văzut mai sus, sistemul simplificat de reprezentare a sarcinilor prin impedanțe constante, ceea ce revine la caracteristicile simplificate :

— putere activă $P = p_1 U^2$ ;

— putere reactivă $Q = y_1 U^2$.

Cu toate că nesatisfăcător, acest fel de reprezentare este generalizat azi din motive de simplicitate. Chiar în calculele ce se fac cu mese de calcul de curent alternativ se introduc aceleași caracteristici pentru sarcini corespunzătoare unor simple impedanțe.

Reprezentările regimurilor staționare și dinamice sînt identice pentru puterile reactive, care variază în ambele regimuri, cu pătratul tensiunii, dar diferite esențial pentru puterile active.

În ceea ce privește puterile active, redăm în figura 1 un grafic care ar reprezenta curba de variație a puterilor active plecînd de la un punct de echilibru ($a$) în jurul căruia, pentru deplasări mici ale tensiunii, puterea activă rămîne constantă, iar pentru deplasări mari ale tensiunii variază cu pătratul acesteia.

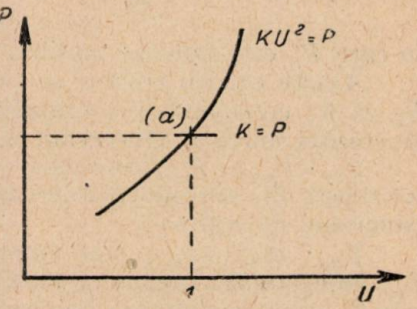



Fig. 1. — Curba $P = f(U)$ în jurul unui punct ($a$) și pentru valori diferite ale tensiunii.

## II. REPREZENTAREA SISTEMULUI ÎN REGIM STAȚIONAR ȘI ÎN MIȘCARE. VECTORII CURENȚILOR DE SCURTCIRCUIT

Am arătat într-un studiu anterior [1], o cale simplă de reprezentare a sistemului redus la un consumator unic sau mai bine zis a reprezentării unui nod al sistemului. La acest nod mașinile legate direct sînt reprezentate fiecare printr-un vector $Y_m E_m$, iar legăturile la alte noduri fie printr-o mașină sincronă, fie printr-un consumator de putere activă și reactivă, care se adună în consumatorul unic al nodului respectiv.

Dacă ținem seama de cele spuse mai sus, stările de echilibru pot fi reprezentate în două moduri. Fie utilizînd pentru mașinile sincrone reactanțele de regim permanent, care țin seama de reacțiunea indusului și de tensiunile corespunzătoare acestor reactanțe, așa cum s-a făcut în rezolvarea problemelor de stabilitate stati ă, fie utilizînd reactanțele tranzitorii și tensiunile acestor reactanțe, așa cum se va face în cele ce urmează, încercînd rezolvarea problemelor așa-numite de stabilitate „dinamică".

Reamintim, pentru un sistem cu $n$ mașini debitînd pe o bară cu tensiunea $U$, ecuațiile puterilor active și reactive și anume :

Pentru puterea reactivă :

$$\sum_{m=1}^{m=n} Y_m \cdot U \cdot E_m \cdot \cos \delta_m - \sum_{m=1}^{m=n} Y_m \cdot U^2 = Y_s \cdot U^2, \qquad (1)$$

în care s-a notat cu :

$Y_m$, admitanța mașinii $m$ pînă la nodul considerat ;
$E_m$, tensiunea internă a mașinii $m$ ;
$\delta_m$, unghiul între tensiunea $E_m$ și tensiunea $U$ a barei ;
$Y_s$, admitanța sarcinii reactive totale.

Pentru puterea activă :

$$\sum_{m=1}^{m=n} Y_m \cdot U \cdot E_m \sin \delta_m = \sum_{m=1}^{m=n} P_m, \tag{2}$$

în care $P_m$ este puterea mașinii.

Aceste ecuații trebuie să poată fi satisfăcute atît în cazul cînd $Y_m$, $E_m$ și $\delta_m$ corespund reactanței tranzitorii, cît și atunci cînd corespund reactanței sincrone. Observăm că în cazul reactanței tranzitorii :

$Y_{mi} \cdot E_{mi} = I_{sc \cdot i}$ este chiar curentul de scurtcircuit inițial, dacă se consideră $E_{mi}$ corespunzătoare reactanței tranzitorii. În cazul reactanței (sincrone) de regim ;

$Y_{mp} \cdot E_{mp} = I_{sc \cdot p}$ este curentul de scurtcircuit permanent cînd și $E_{mp}$ corespunde regimului staționar. În ceea ce privește unghiurile $\delta_{mi}$ sau $\delta_{mp}$ corespunzătoare tensiunilor $E_{mi}$ sau $E_{mp}$, diferite, să ne oprim puțin asupra mărimii lor.

Dacă deducem cele două tensiuni interne $E_{mi}$ și $E_{mp}$ plecînd de la tensiunea $U$ la bornele mașinii ajungem la construcția indicată în figura 2, unde se văd cele două unghiuri $\delta_{mi}$ și $\delta_{mp}$.

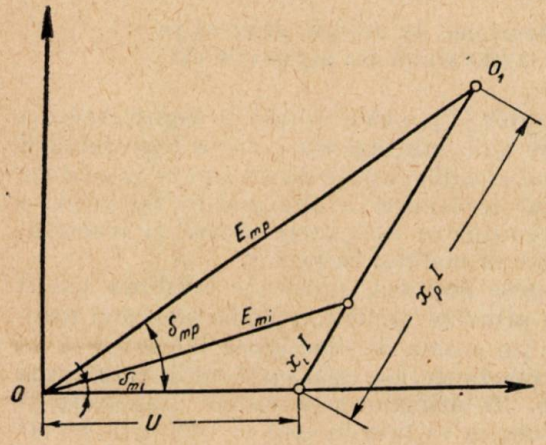



Fig. 2. — Tensiunile interne $E_{mi}$ și $E_{mp}$ corespunzătoare regimului tranzitoriu și regimului permanent.

Se observă că graficul ce se obține cu valorile inițiale (reactanțele tranzitorii) are unghiuri mai mici pentru generator. Apare de aci că un sistem în regim dinamic ar putea păstra mai ușor poziția în jurul unui punct decît în regim staționar. Se deduce de aici că dacă s-a verificat stabilitatea dinamică pentru o situație este indispensabil să se verifice și stabilitatea statică pentru poziția staționară finală.

Observăm deci că în ecuațiile (1) și (2), *termenii* $Y_m E_m$ *sînt chiar curenții de scurtcircuit pe care îi dau mașinile respective* în caz de scurtcircuit pe bara unică considerată. Vom nota mai departe :

$Y_m E_m = I_m$ curenții de scurtcircuit ai mașinii fie cei inițiali, fie cei permanenți. Cu aceste notații, dacă împărțim ecuațiile (1) și (2) cu tensiunea $U$, găsim :

$$\sum_{m=1}^{m=n} I_m \cos \delta_m = \left( Y_s + \sum_{m=1}^{m=n} Y_m \right) U, \tag{3}$$

$$\sum_{m=1}^{m=n} I_m \sin \delta_m = \sum_{m=1}^{m=n} \frac{P_m}{U}. \tag{4}$$

Putem astfel construi două grafice, pentru o anumită stare de încărcare a generatorilor: una cu curenții de scurtcircuit inițiali (reactanță tranzitorie) și a doua cu curenți de scurtcircuit permanenți (reactanță sincronă). Această a doua reprezentare a fost utilizată în metoda „consumatorului unic" propusă în [1] pentru cercetarea stabilității statice.

Vom încerca acum o analiză a sistemului în regim dinamic cu prima reprezentare dată de curenții de scurtcircuit inițial. Vom observa că considerăm pentru deducerea curenților de scurtcircuit reactanța tranzitorie, iar nu cea subtranzitorie și deci procedăm așa cum se face deobicei în stabilitatea dinamică.

## III. REPREZENTAREA PRIN CURENȚI DE SCURTCIRCUIT A DIFERITELOR STĂRI ȘI A SCHIMBĂRILOR BRUȘTE

Se consideră mai departe ca și la stabilitatea statică, schema redusă la un nod cu tensiune $U$ și cu o serie de mașini sincrone legate la el.

Schimbările bruște ce pot apărea într-o asemenea rețea electrică se pot clasifica în două categorii și anume:

*a*) schimbări bruște în mărimea sarcinii active sau reactive a sistemului în nodul considerat;

*b*) schimbări bruște ale impedanței de legătură a generatoarelor la nodul ce se studiază.

Vom urmări mai întîi prima categorie căutînd să aplicăm cele spuse mai sus.

Presupunem deci că consumația trece de la valorile inițiale $P_1$ și $Q_1$ la valorile $P_2$ și $Q_2$. Trecerea la noile valori $P_2$ și $Q_2$ trebuie înțeleasă: din cauza unei modificări în circuitele alimentate (de exemplu ieșirea unei linii din circuit) a ieșit o parte din sarcină, ceea ce în condițiile de tensiune respective din momentul imediat anterior schimbării, conduce la noile valori $P_2$ și $Q_2$.

Presupunem că sarcinile au o caracteristică dinamică pentru trecerea de la o stare la alta de forma $K\,U^2$, adică:

inițial

$$P_1 = p_1\,U^2, \quad Q_1 = q_1\,U^2$$

iar după schimbare

$$P_2 = p_2\,U^2, \quad Q_2 = q_2\,U^2.$$

După cum s-a arătat, (vezi [1])*, locul geometric al celor două stări poate fi reprezentat pe diagramele de scurtcircuit prin două drepte ce trec prin origine, deoarece atît ordonatele, cît și abscisele punctului cu consumație $P_1$ și $Q_1$ respectiv $P_2$ și $Q_2$ sînt de forma $K\,U$. Punctul de funcționare va trece deci de pe o dreaptă pe cealaltă.

În ceea ce privește trecerea de la o stare la alta, trebuie considerate bineînțeles, mișcările rotorilor cu momentele lor de inerție. Deocamdată

*) p. 143.

să ne ocupăm de reprezentarea celor două stări înainte și după schimbare și să lămurim dacă după schimbarea bruscă intervenită, în cazul de speță, a sarcinii, există o nouă stare de echilibru în general.

Vom urmări acest caz general pe un exemplu cu 2 centrale pentru simplificare (fig. 3).

Prima stare înaintea schimbării este reprezentată (fig. 3, *c*) prin punctul de funcționare $O_2$ ale cărui coordonate sînt :

$$x = (y_a + y_b + q_1)\ U\ ;$$

iar

$$y = \frac{P}{U} = \frac{p_1 U^2}{U} = p_1 U\ ;\quad \frac{x}{y} = \frac{y_b + y_a + q_1}{P_1}\ ,$$

în care s-a notat cu :

$U$, tensiunea barei centralei $B$, pentru care se face diagrama de scurtcircuit ;

$y_a$ și $y_b$, admitanțele totale ale celor două centrale $A$ și $B$ pînă la bara de 6 kV a centralei $B$ ;

$p_1$, constanta ce determină mărimea puterii active funcție de tensiune, în ipoteza că puterea variază cu pătratul tensiunii $P = p_1 U^2$ ;

$q_1$, admitanța sarcinii reactive ;

$E_a$ și $E_b$, tensiunile interne ale generatorilor $A$ și $B$ (centralele reduse la un singur generator) ;

$I_a$ și $I_b$ curenții de scurtcircuit ai celor două centrale.

Variația bruscă a sarcinii înseamnă modificarea celor două constante :

$q_1$ în $q_2$, pentru puterea reactivă ;

$p_1$ în $p_2$. pentru puterea activă.

Locul punctului $P_2$, după schimbarea de stare, se va găsi neapărat undeva pe dreapta $OO'_2$ și va avea drept coordonate $x = (y_a + y_b + q_2)\ U''$, iar $y = p_2\ U''$.

Trebuie însă observat că în primul moment, ținînd seama de faptul că rotorii vor păstra aceeași poziție relativă unul față de celălalt din cauza inerției, trecerea pe dreapta $OO''_2$ se va face prin simplă rotire a liniei frînte $OO_1O_2$.

După aceea noul punct de funcționare $O'_2$ ar trebui să se deplaseze de-a-lungul dreptei $OO''_2$, pînă cînd fiecare generator își va fi regăsit echilibrul de puteri. Nu ne vom ocupa deocamdată de regimurile succesive de trecere pînă la starea finală, ci numai de determinarea punctului final de echilibru, dacă există unul.

Poziția finală a punctului trebuie căutată ținînd seama de puterea mașinilor care trebuie să fie aceeași ca la început și de faptul că punctul de funcționare se plimbă pe dreapta $OO'_2$. În lucrarea anterioară [1] s-a dat o metodă generală valabilă pentru un număr $n$ de generatori, prin care se găsește locul geometric al punctelor ce conduc la aceeași repartiție a puterilor pe generator. Se vede ușor că pentru punctul final de funcționare nu pot fi împlinite simultan următoarele trei condiții și anume :

1) să se afle pe noua dreaptă a consumației ($OO''_2$) ;

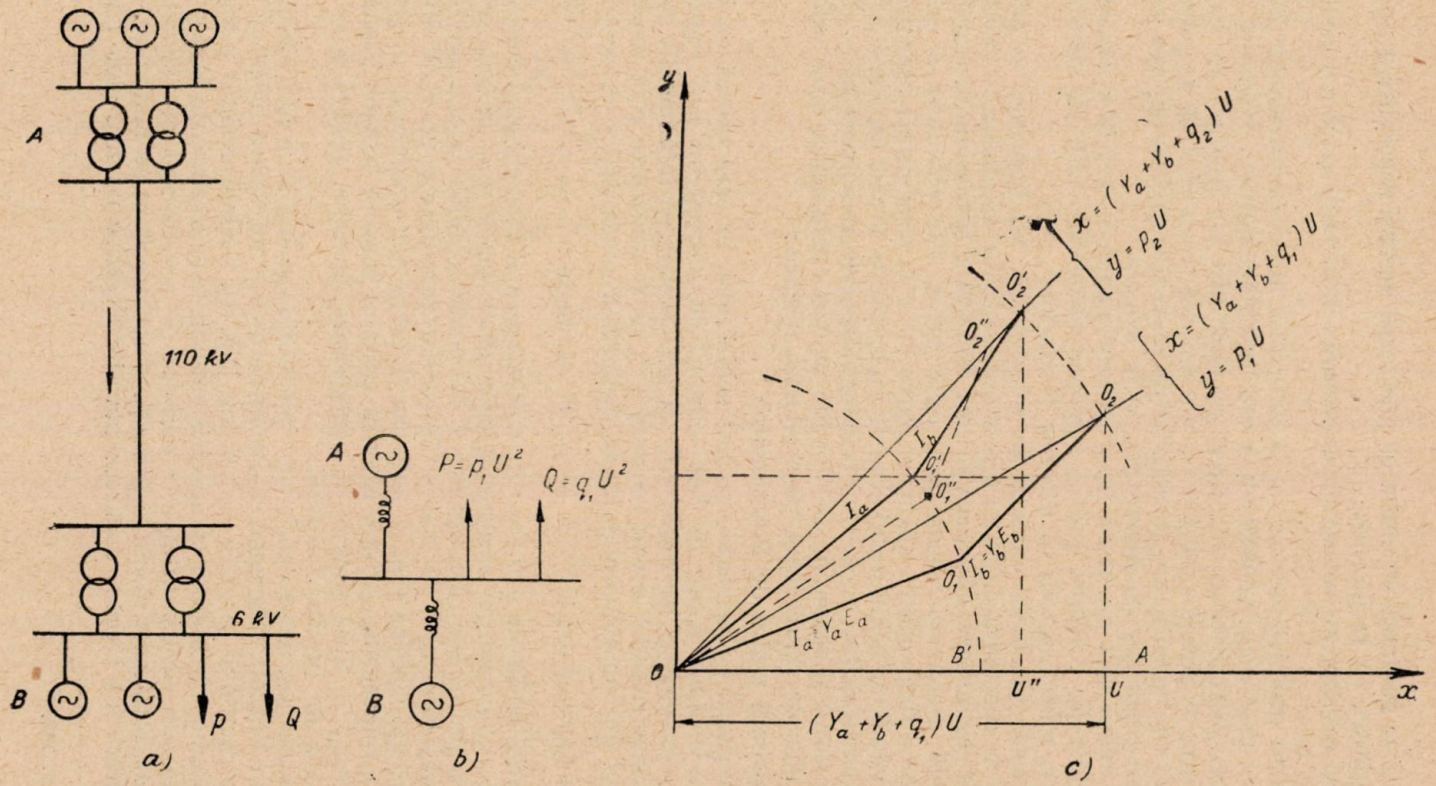



Fig. 3

*a*) Sistemul cu două centrale; *b*) sistemul redus; *c*) reprezentare prin vectori de scurtcircuit.

2) să se găsească pe curba ce păstrează aceeași repartiție a puterilor pe generatori, ca la început;

3) să se păstreze aceeași putere totală (curba respectivă e o hiperbolă, vezi [1]*).

Pentru cititorii care nu au la îndemînă lucrarea anterioară din care se deduce ușor cazul general cu cele 3 locuri geometrice, exemplul cu doi generatori poate fi examinat direct pe diagrama din figura 3, *c*). În fond, pe diagramă se pot găsi puncte, în care puterea electrică dată de generatori este egală cu cea luată de sarcină, dar nu mai este egală cu puterea inițială, în aceeași repartiție pe generatori, ca la început.

*Va exista deci un punct final de funcționare de echilibru numai dacă se modifică fie excitația (adică mărimea vectorilor YE), fie admisiunea turbinelor, adică puterile la arborele turbinelor.*

Această concluzie extrem de interesantă, nu figurează explicit în lucrările de specialitate. Ea dă o justificare în plus calculelor de stabilitate dinamică oprite la examinarea primei oscilații a sistemului și clarifică în ce măsură asemenea calcule sînt orientative. Ele pot avea o oarecare exactitate numai pentru cazurile „instabile", în care prima oscilație conduce la pierderea echilibrului și unde nu ar trebui în nici un caz considerat acest proces complet, în care intervin regulatoarele, reacțiunea indusului etc.

Revenind și rezumînd concluziile pentru examinarea unei schimbări bruște, sînt de reprezentat pe asemenea grafice:

1) primul regim de funcționare;

2) regimul ce urmează imediat schimbării, în care rotorii cu inerție rămîn în aceeași poziție și deci curenții de scurtcircuit ce-i reprezintă, pe cînd consumația de forma $pU^2$ și $qU^2$ presupusă fără inerție, permite orice poziție relativă a noii tensiuni $U''$, ce se stabilește prin deplasarea punctului de funcționare pe noua dreaptă a consumației cu coordonate

$$x = (y_a + y_b + q_2)\ U \quad \text{și} \quad y = p_2\ U \quad \text{și unghi}: \frac{x}{y} = \frac{y_a + y_b + q_2}{p_2}.$$

Considerațiile de mai sus sînt valabile numai în cazul cînd consumația nu pune nici o condiție tensiunii în legătură cu inerția unor piese în mișcare. Astfel, se presupune că tensiunea $U$ își poate schimba faza necondiționat din primul moment și tot timpul în care se examinează procesul dinamic. Dacă sarcina conține însă și motoare sincrone sau aparate ce ar putea fi asimilate cu acestea, atunci această parte a sarcinii trebuie separată și reprezentată în mod similar ca generatoare sincrone, pentru a se putea ține seama de inerția rotorului.

În acest din urmă caz, cînd o parte din sarcină ar fi fost similară cu un motor sincron, diagrama mai conține deci și un vector orientat în jos, lucrurile rămînînd identice ca mai sus (fig. 4). Trebuie reținut pînă acum că o schimbare bruscă în compoziția sarcinii se reprezintă de fapt printr-o rotire de axe corespunzătoare; curenții de scurtcircuit ai mașinilor, ce reprezintă rotoarele, rămîn nemișcați. După trecerea pe noile axe, starea de echilibru s-a stricat, deoarece puterile electrice nu mai sînt egale cu

*) p. 142.

puterile mecanice la arborele generator, care au rămas aceleași ca în cazul inițial cu axele nerotite.

Să examinăm acum cazul *b*) în care se schimbă brusc starea generatorilor și anume :

*dispare un grup* (scos brusc din circuitul de protecție).

În acest caz, pe diagrama respectivă dispare un vector sau se modifică un vector în cazul în care grupul ieșit din circuit făcea parte dintr-un gene-

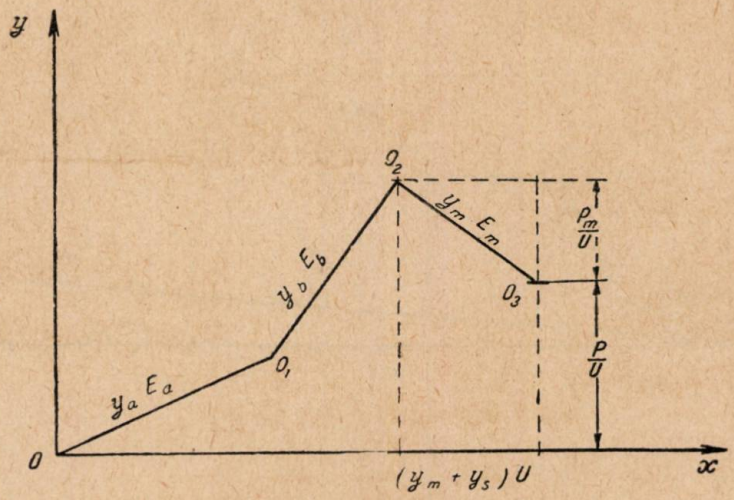



Fig. 4. — Sarcina conține și motoare sincrone. Vectorul $O_2O_3$ reprezintă motorul sincron echivalent al sarcinii respective ce absoarbe o putere activă $P_m$ și o putere reactivă $y_s U^2$.

rator echivalent reprezentat printr-unul din vectori (pe fig. 5, *b*), dispare $O_6O_7$ sau i se modifică mărimea, așa cum s-a arătat pe diagramă).

Astfel, în primul moment, pentru a se păstra echilibrul electric al puterilor, punctul de funcționare se va muta în $O_7'$ printr-o schimbare de axe, ceea ce echilibrează puterile electrice ale sarcinii cu ale generatorilor.

Dreapta veche a consumațiilor avea ordonata pentru punctul $O_7$

$$Y = p_1 U,$$

iar abscisa

$$X = \left( Y_s + \sum_{1}^{m=7} Y_m \right) U,$$

iar unghiul dreptei consumației

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{y}{x} = \frac{p_1}{Y_s + \sum_{m=1}^{m=7} Y_m}.$$

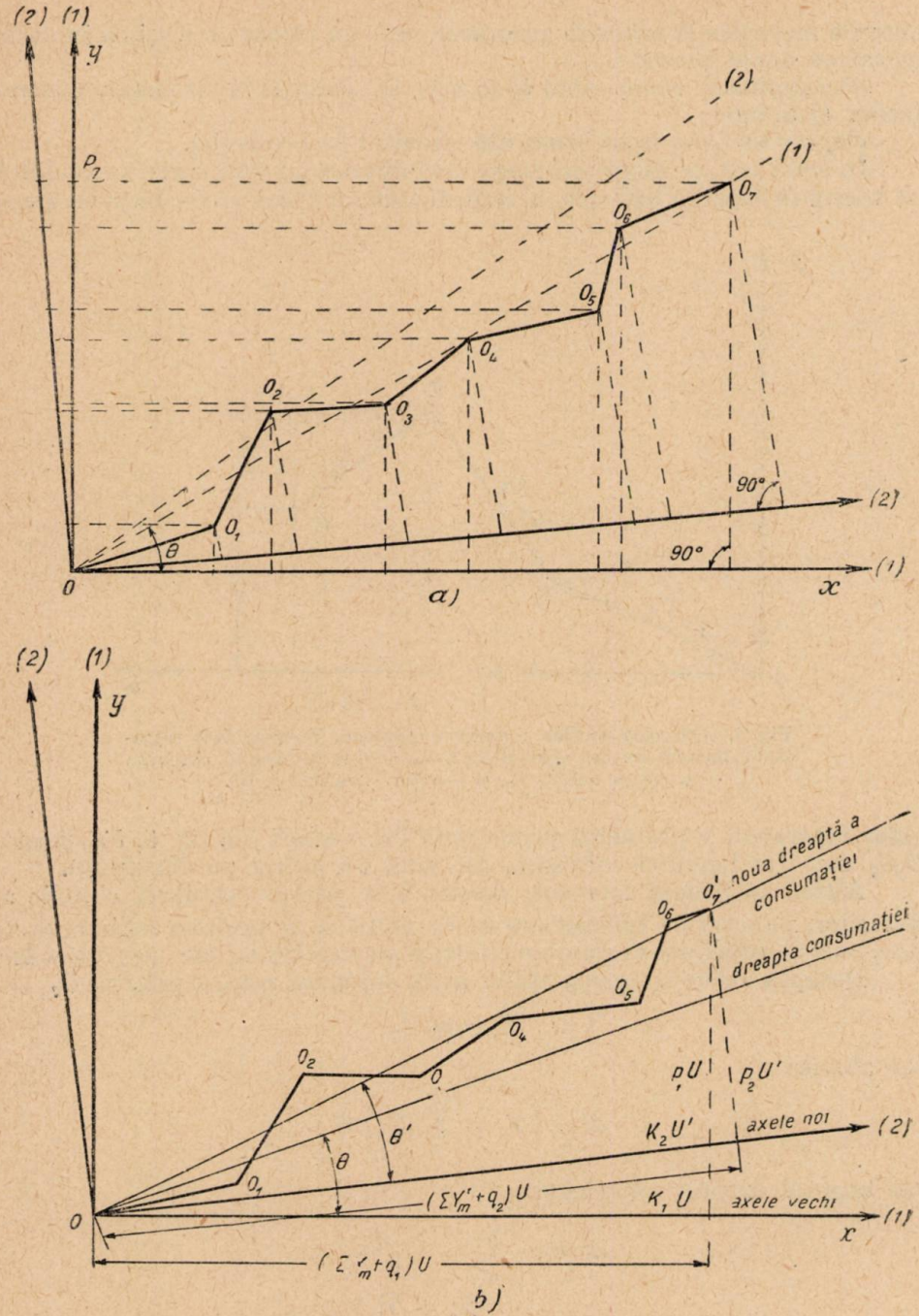



Fig. 5. — Modificări bruște în starea generatorilor.

După modificarea unui generator (generatorul $O_6O_7$), se modifică $\sum_{m=1}^{m=7} Y_m$ care se însumează în noua situație a generatorilor și devine $\sum_{m=1}^{m=7'} Y_m$. Noul unghi al consumației, cu axa $Ox$, va fi :

$$\frac{p_1}{\sum_{m=1}^{m=7'} Y_m + Y_s} = \operatorname{tg} \theta'.$$

Deci, momentul imediat următor după modificarea grupului $O_6O_7$ este reprezentat prin dreapta de consumație $O_6O'_7$ și noile axe care fac unghiul $\theta'$ ($Ox$ cu $OO'_7$) cu dreapta nouă de consumație, în locul unghiului $\theta$ vechi. *În concluzie rezultă și aici o rotire de axe.*

*Schimbări în circuitele ce leagă generatorii de bară.* Acest caz este identic cu cel de mai sus, căci conduce în fond, din considerarea schemelor echivalente, la modificarea unuia din vectorii ce reprezintă generatorul respectiv, de exemplu $O_7$ devine $O'_7$ (fig. , *b*)). Astfel, să presupunem că generatorul reprezentat de dreapta $O_6O_7$ alimenta bara prin două circuite în paralel din care unul este scos din funcțiunea de protecție. În acest caz, dacă admitanța veche este $y_0$ ea devine $y'_0$ iar vectorul $O_6O_7$ devine $O_6O'_7$ (fig. 5, *b*)). Reprezentarea deci se face ca mai sus, axele vor trece în (2) și fac un unghi $\theta$ cu dreapta nouă a consumației. Deci și aici intervine o rotire de axe.

## IV. CONSTRUCȚIA GENERALĂ CE REZULTĂ PENTRU REPREZENTAREA TRECERII DE LA O STARE LA ALTA CU AJUTORUL GRAFICELOR DE SCURTCIRCUIT. EVALUAREA MĂRIMILOR (DEDUCEREA SCĂRILOR)

Din examinarea situațiilor de mai sus se poate trage o concluzie generală asupra ordonării operațiunilor și măsurarea mărimilor în reprezentarea situațiilor prin grafice de scurtcircuit. Vom descrie pe rînd fiecare operație în parte.

1) *Se află toți curenții de scurtcircuit* ai fiecărei căi de curent, ce concură la nodul respectiv în starea de excitație respectivă a mașinilor, conform sarcinii și se trasează linia frîntă care reprezintă rotorii tuturor mașinilor sincrone.

2) *Așezarea punctului inițial de funcționare.* El are deci ordonata $y = p_1 U$ și abscisa

$$x = \sum_{m=1}^{m=n} (Y_m + q_1) U.$$

Pentru punctul inițial de funcționare se ia tensiunea $U = U_n = 1$ și deci $y = p_1$, iar

$$x = \sum_{m=1}^{m=n} (Y_m + q_1).$$

Deci se află constanta $p_1$ din consumația de putere activă și se deduce ordonata punctului de funcționare $y$, iar pentru abscisă se însumează toate admitanțele generatorilor la care se adaugă admitanța sarcinii (fig. 5, *a*) sau 5, *b*)).

3) *Deducerea scărilor.* Se face în modul cel mai simplu din măsurarea pe diagramă a curenților. Astfel, pentru curentul total watat, măsurăm ordonata punctului $O_7$ de funcționare și fixăm scara : 1 mm = A amperi. Scara amperilor odată fixată se deduce tot restul cu cea mai mare ușurință și se face legătura între diverse diagrame pentru diverse situații ale sistemului, *deoarece scara curenților rămîne aceeași.* De exemplu, prin măsurarea în amperi a vectorilor reprezentînd curenții de scurtcircuit ai mașinilor ($OO_1, \ldots, O_1O_2, \ldots$ etc.) se deduce tensiunea internă (și deci excitația) pentru fiecare generator în parte, împărțind cu admitanța.

4) *Circuitele și-au schimbat starea* (*fig. 5, b*). S-a modificat brusc sarcina sau starea generatorilor ($q_1$ a trecut în $q_2$, sau $y_m$ pentru un generator în $y'_m$). În acest caz dreapta care reprezintă locul geometric al sarcinii, $y = p_1 U$, $x = \left( \sum_{m=1}^{m=n} Y'_m + q_1 \right) U$, își schimbă înclinarea față de axa $Ox$, deoarece abscisa și ordonata s-au schimbat în cazul generatorului și anume :

$$y = p_2 U ; \quad x = \left( \sum_{m=1}^{m=n} Y'_m + q_2 \right) U .$$

Deci unghiul cu axa $Ox$ care mai sus era dat de relația

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{p_1}{\sum_{m=1}^{m=n} Y_m + q_1}$$

devine

$$\operatorname{tg} \theta' = \frac{p_2}{\sum_{m=1}^{m=n} Y'_m + q_2}$$

De fapt se face o simplă rotire de axe, linia frîntă $OO_1O_2$ etc. rămîne identică pentru toți generatorii ce nu s-au modificat, poziția relativă a rotorilor rămînînd neschimbată în primul moment. Se poate imediat măsura pe noua diagramă diverse mărimi ce ar interesa (curenți, tensiuni, puteri etc.), ținînd seama de faptul că scara curenților nu s-a schimbat. Puterile și tensiunile se deduc din această ultimă considerație.

Schimbarea de axe indicată, după cum s-a arătat, rezultă din egalizarea puterilor electrice date de generatori și consumate de sarcină (active și reactive) în noua situație.

5) *Noile puteri active pe fiecare generator în parte* se află prin măsurarea proiecțiilor pe noua axă $OY$ a vectorilor $OO_1$, $O_1O_2, \ldots$ etc.

Noile puteri reactive, repartizate pe fiecare generator în parte, se deduc din măsurarea proiecțiilor pe axele $OX$ ale acelorași vectori.

Se poate deduce deci și *dezechilibrul între puterea la arborele fiecărui generator*, care este puterea veche din prima diagramă, mai puțin puterea electrică nouă pe care o dă fiecare generator în noua situație (adică diferența $\Delta P$ pentru fiecare generator în parte).

6) *Deplasarea sistemului.* După ce s-au stabilit toate elementele necesare inclusiv diferențele de putere pe fiecare generator în parte ($\Delta P$), deplasarea sistemului se va face considerînd mișcarea rotorilor, așa cum se va arăta mai departe.

★

*Trebuie notat pînă aici că orice schimbare bruscă în starea circuitelor, a sarcinilor sau a generatorilor are drept consecință* :

*a*) o rotire a axelor;

*b*) păstrarea aceleiași scări pentru curenți;

*c*) unghiurile rotoarelor (pe diagramă a curenților de scurtcircuit) rămîn identice între ele.

BUDAPESTI MŰSZAKI EGYETEM KÖZPONTI KÖNYVTÁRA 1848

## V. REPREZENTAREA MIȘCĂRII ROTORILOR

### Generalități

Pînă aici am văzut cum se poate reprezenta un nod al unui sistem energetic prin diagramele curenților de scurt circuit în diversele situații de funcționare. De asemenea, s-a arătat reprezentarea sistemului în situații de trecere, atunci cînd puterile electrice debitate de generatori nu mai sînt egale cu puterile mecanice. Trecerile prin diversele stări, în acest caz, sînt condiționate și de momentele de inerție ale generatorilor și eventual ale sarcinilor, cînd e cazul. Pentru un generator oarecare este valabilă ecuația diferențială cunoscută :

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = \Delta P = P_{\text{mecanic}} - P_{\text{electric}} .$$

După cum se știe, această ecuație nu poate fi rezolvată sub formă generală. În practică, calculele de stabilitate dinamică se fac în general prin metode simplificate, problema reducîndu-se de cele mai multe ori la sistemul generatorsincron motorsincron și analiza fenomenelor pe linia de legătură între cele două mașini. Calculul „pas cu pas", pentru rezolvarea ecuației mișcării de mai sus, permite urmărirea în timp a deplasărilor sistemului. Acest calcul „pas cu pas" se face în general pentru sisteme cu *maximum trei mașini, deoarece peste acest număr de mașini devine prea laborios.* Sarcina în asemenea calcule este asimilată cu o impedanță în timpul deplasării rotorilor. Valoarea inițială a sarcinii determină mărimea impedanței.

În calculele „pas cu pas" ce se fac în practică, pentru două sau maximum trei rotoare, se urmărește unghiul relativ al mașinilor. Dacă acest unghi, după ce trece printr-o valoare maximă se micșorează, se spune că sistemul e stabil. Dacă unul din unghiurile dintre rotoare se mărește indefinit,

se spune că sistemul e instabil. Acest fel de a proceda redus la examinarea primei oscilații se justifică și prin faptul că în acest calcul sînt neglijate amortizările care încetinesc mișcările și opresc sistemul imediat după prima oscilație. Astfel, se consideră că prima oscilație este cea periculoasă.

Vom căuta și noi să urmăm aceeași cale de examinare „pas cu pas" a fenomenului, în timpul trecerilor prin diverse schimbări bruște, datorită unor împrejurări ca: scurtcircuite, separări de circuite prin tăieri de întrerupători etc. Prin posibilitatea urmăririi „pas cu pas" a stării sistemului, atunci cînd este pierdut echilibrul între puterea mecanică și cea electrică, se poate rezolva orice problemă de stabilitate de orice natură.

**Determinarea deplasării fiecărui rotor în intervalul elementar de timp considerat**

Fie starea din figura 6, reprezentată de punctul $O_{m1}$, punct de funcționare pe diagrama curenților de scurtcircuit. Poziția $O_{n1}$, raportată la axele $Ox$ și $Oy$ este o stare la care s-a ajuns la un moment dat printr-o schimbare bruscă (scurtcircuit, deschiderea sau închiderea unui întrerupător etc.). În această situație, puterile mecanice pe arborii generatorilor nu mai sînt egale cu cele electrice, acestea din urmă fiind modificate de schimbarea bruscă intervenită. Situația anterioară acestei schimbări bruște nu a mai fost reprezentată pe figura 6 pentru simplicitate (poziția 2 din fig. ).

La punctul III s-a arătat cum se trece printr-o simplă schimbare de scări și axe, de la o stare a circuitelor la altă stare. În noua stare a circuitelor obținem pe diagramă, după cum am văzut, toate elementele regimului electric imediat următor după schimbare, necesare calculului și anume:

1) Noua tensiune la nodul respectiv;

2) Variația puterii electrice pe fiecare generator în parte ($\Delta P_1$, $\Delta P_2$, $\Delta P_3$,... etc.), precum și variația puterii totale electrice în noua situație a circuitelor.

Dacă se cunosc și momentele de inerție ale rotoarelor, calculul deplasării rotorilor se poate face cu cea mai mare ușurință aplicînd metoda „pas cu pas", pe intervale de timp scurte în care putem considera $\Delta P = \text{const.}$ Reamintim ecuația:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\Delta P}{M} = \alpha_{(0)}. \tag{5}$$

Cu ajutorul acestei ecuații se calculează creșterea vitezei $\Delta V_{(1)}$ și a unghiului $\Delta\delta_{(1)}$ în cursul primului interval:

$$\Delta V_{(1)} = \alpha_{(0)} \cdot \Delta t \; ; \quad \frac{\Delta V_{(1)} \cdot \Delta t}{2} = \Delta \cdot \delta_{(1)}$$

$$\Delta\delta_{(1)} = \alpha_{(0)} \cdot \frac{\Delta t^2}{2} \; , \tag{6}$$

deoarece în momentul inițial $\Delta V = 0$, iar în momentul final al primului interval $\Delta V = \Delta V_{(1)}$.

Dacă înlocuim pe $\alpha_{(0)}$ obținem

$$\Delta\delta_{(1)} = \frac{\Delta t^2}{M} \cdot \frac{\Delta P_0}{2}$$

și dacă unghiul îl exprimăm în grade în loc de radiani înmulțim cu 360 $f$, adică :

$$\Delta\delta_{(1)} = \frac{360\ f.\ \Delta t^2}{M} \cdot \frac{\Delta P_0}{2} \quad \text{sau}$$

$$\Delta\delta_{(1)} = \frac{\Delta P_0}{2} \cdot K \qquad K = \frac{360\ f\ \Delta t^2}{M}. \tag{7}$$

La începutul intervalului următor unghiul va fi deci :

$$\delta_{(1)} = \delta_0 + \Delta\delta_{(1)}. \tag{8}$$

Cu aceste noi unghiuri calculate după primul interval, pentru toți generatorii, cu formula (7), se așază o a doua serie de curenți de scurtcircuit reprezentînd linia frîntă 2 de pe figura 6. Această a doua serie reprezintă poziția pe care o iau rotorii după primul interval de timp $\Delta t$, și proiecția acestei linii frînte pe axele (2) de coordonate va da noile puteri pe fiecare generator în parte și deci și diferențele de puteri $\Delta P_{(1)}$ pentru fiecare generator la sfîrșitul primului interval.

Pentru a deduce acum creșterea unghiului $\Delta\delta_{(2)}$ la sfîrșitul intervalului al doilea de timp pentru toți generatorii trebuie să ținem seama și de viteza relativă $V_{(1)}$ a rotorului la începutul acestui interval, adică

$$\Delta\delta_{(2)} = V_{(1)}\ \Delta t + \frac{\alpha\,(1)\ \Delta t^2}{2} = V_{(1)} \cdot \Delta t + K\,\frac{\Delta P_{(1)}}{2}. \tag{9}$$

Valoarea vitezei $V_{(1)}$ poate fi obținută fie din formula $\Delta V_1 = \alpha_{(0)}\ \Delta t$ sau mai exact, ținînd seama de variația accelerației în cursul primului interval

$$V_{(1)} = \frac{\alpha_{(0)} + \alpha_{(1)}}{2} \cdot \Delta t.$$

Introducînd această valoare în ecuația (9) obținem

$$\Delta\delta_{(2)} = \frac{\alpha_{(0)} + \alpha_{(1)}}{2}\ \Delta t^2 + \frac{\alpha_{(1)}\ \Delta t^2}{2} = \frac{\alpha_{(0)}}{2}\ \Delta t^2 + \alpha_{(1)} \cdot \Delta t^2,$$

iar cu $\frac{\alpha_{(0)}}{2} \cdot \Delta t^2 = \Delta\delta_{(1)}$ obținem

$$\Delta\delta_{(2)} = \Delta\delta_{(1)} + K \cdot \Delta P_1 \tag{10}$$

în care $K$ are aceeași valoare de mai sus.

Cu aceste noi unghiuri $\Delta\delta_{(2)}$, calculate pentru fiecare generator în parte, se trasează o serie de vectori de scurtcircuit, linia frîntă 3 pe figură,

care reprezintă poziția rotorilor la sfîrșitul celui de al doilea interval de timp.

De aici încolo lucrurile merg pe aceiași cale mai departe, pentru intervalele următoare, deducîndu-se numărul de poziții necesare pentru o orientare.

★

De asemenea, se pot obține deplasările unghiulare ale mașinilor în timp, prin aplicarea de curbe precalculate. Acest sistem se va aplica atunci cînd ne putem rezuma la o aproximație mai mare și intervale de timp mai lungi sau în cazuri speciale, cînd vom căuta, de exemplu, poziția unor generatori relativ mici într-un ansamblu puternic.

Să reamintim în esență această metodă:

Plecăm de la ecuația pentru generatorul $m$ :

$$M_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - Y_m E_m U \sin \delta_m = P_m - B_m \sin \delta_m , \qquad (11)$$

dacă împărțim cu $B_m$ și introducem un timp fictiv $\tau_m = t \cdot \sqrt{\frac{B}{M_m}}$ obținem

$$\frac{d^2\delta_m}{d\tau^2_m} = \frac{P_m}{B_m} \cdot \sin \delta_m = T - \sin \delta_m ,$$

unde $T_m = \frac{P_m}{B_m}$ : adică raportul dintre puterea mecanică la arborele rotorului și puterea maximă $Y_m E_m U \sin 90^\circ = B_m$.

Se obține astfel ecuația simplificată

$$\frac{d^2\delta_m}{d\tau^2_m} = T_m - \sin \delta_m . \qquad (12)$$

Această ecuație se găsește gata rezolvată în diverse manuale sub forma curbelor de variație a unghiului rotorului în funcție de timpul fictiv. Aceste curbe sînt date în anexa 2.

Din cele 10 curbe precalculate, la fiecare mașină în parte, se aplică curba ce are același unghi inițial cu cel al mașinii respective, adică la timpul $t = 0$, mărimea fictivă $\tau$ pentru fiecare mașină se va deduce conform ecuației (12), în care termenul $B_m$ e citit pe grafic, iar unghiul inițial se măsoară pe diagrama de scurtcircuit pentru fiecare mașină în parte.

Astfel, se citește pentru timpii fictivi $\tau$ ai fiecărei mașini unghiul nou $\delta$ în grade, pe care îl ia mașina respectivă pe curba $T$ corespunzătoare și se determină starea 2 a rotorilor după un timp mai lung.

Aproximația care se face pentru aprecierea acestei deplasări în timpul ales, este că se presupune tensiunea $U$ constantă ca mărime însă păstrîndu-și faza.

În ceea ce privește faza acestei tensiuni, după cum am văzut, ea se deplasează o dată cu deplasarea rotorilor, în așa fel ca să fie respectate condițiile puse de consumația fără inerție. Aceasta înseamnă că punctul de funcționare $O_m$ va trebui să se găsească în permanență pe o dreaptă făcînd cu axa $O_x$ același unghi de la timpul $t = 0$. Aceasta înseamnă că la fiecare nou timp axele trebuie rotite, pentru a restabili unghiul consumației.

În ceea ce privește aproximația ce se face prin considerarea tensiunii $U$ constantă ca mărime și în fază, în intervale elementare de calcul, care prin metoda curbelor precalculate sînt mai mari, observăm că erorile ce se

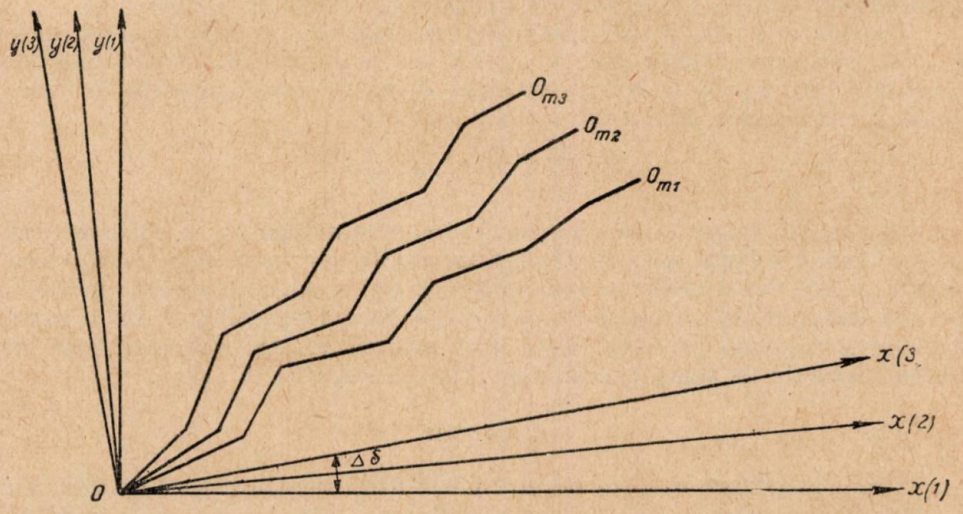



Fig. 6. — Trei stări succesive de deplasare a rotorilor în timp.

introduc sînt în același sens pentru toate rotoarele, ceea ce micșorează eroarea ce se face în evaluarea mărimii relative a unghiurilor între rotoare. Cu această metodă, a curbelor prelcaculate, ne putem de multe ori rezuma la examinarea a cîteva serii de intervale numai, eventual chiar un singur interval de timp.

Astfel se măsoară pe diagrama ce s-a obținut pentru a doua situație (după un singur interval de timp), poziția rotorilor în momentul unei noi schimbări care intervine, cum ar fi de exemplu : eliminarea unui scurt-circuit, ieșirea unei linii etc.

Este de recomandat ca aceste curbe precalculate *să fie utilizate pentru cazurile cînd se dorebește cunoașterea situației după un anumit timp t* (timpul de lucru al unui releu de exemplu), dînd o indicație rapidă și prețioasă. Calculatorul va aprecia după caz dacă calculul mai trebuie verificat cu metoda „pas cu pas" sau nu. În general, dacă situația finală ce rezultă e foarte diferită de cea inițială, se recomandă o recalculare și cu metoda „pas cu pas" arătată mai sus.

## VI. APRECIEREA VARIAȚIEI FRECVENȚEI CU AJUTORUL DIAGRAMELOR DE SCURTCIRCUIT

Am văzut mai sus că în reprezentarea diverselor stări de trecere ale sistemului, după anumite intervale elementare de timp, axele de referință sînt rotite pentru fiecare interval de timp în parte, în așa fel ca unghiul consumației să fie menținut constant (vezi fig. 6). Astfel, axa inițială $Ox$, în fază cu tensiunea inițială $U$, se deplasează în $Ox_2$, $Ox_3$, etc., aceste noi dispoziții ale axelor fiind în fază cu noile tensiuni pe care le ia nodul.

Dacă considerăm că în prima poziție $Ox_1$, tensiunea $U$ are frecvența nominală, deplasările ce se obțin ulterior pentru $OX$ în fază cu tensiunea, dau indicații asupra variațiilor frecvenței tensiunii $U$ și anume :

Dacă între o poziție oarecare și poziția obținută după un timp oarecare $\Delta t$ s-a obținut o deplasare a axelor cu unghiul $\Delta\delta$, atunci unghiul total real este $\omega_0\ \Delta t + \Delta\delta$. Frecvența, deci, în acest interval de timp poate fi considerată că a avut valoare mijlocie

$$\frac{\omega_0 \cdot \Delta t + \Delta\delta}{\Delta t} = \omega_0 + \frac{\Delta\delta}{\delta t}.$$

Astfel, din inspectarea diagramei și a deplasărilor ce se obțin pentru axe, se poate estima dacă neglijarea frecvenței se poate face. Orientarea rapidă și fără nici un calcul suplimentar pe care o permite această metodă, pentru examinarea variației frecvenței pe bara respectivă, îi dă o mare calitate în această privință. Este deci evident că variația frecvenței în nodul respectiv se poate examina tot timpul mișcării rotorilor.

## CONCLUZII

Din cele arătate mai sus rezultă posibilități relativ ușoare de aplicare a metodei așa denumite a „consumatorului unic" în cercetarea stabilității dinamice. Bineînțeles și aici metoda convine în special pentru nodurile cu concentrație mare de putere și cu scheme apropiate de schema redusă pentru calcul, la un consumator unic.

Aplicarea metodei are următoarele trăsături caracteristice :

1° Se trasează reprezentări identice cu cele utilizate la stabilitatea statică, în care fiecare generator este reprezentat prin curentul său de scurtcircuit orientat după încărcările mașinii ;

2° Caracteristicile în calcul, pentru reducerea mărimilor ce se reprezintă sînt cele „dinamice" ;

3° În cursul deplasării rotorilor, se trasează o serie de stări, care împreună conduc la o reprezentare sugestivă a întregului proces.

Avantajele acestei metode sînt :

1) Rapiditatea calculului, care se poate efectua pentru un număr ori cît de mare de generatori concentrați pe o bară.

2) Vizionarea procesului dinamic în timp, ceea ce permite concluzii generale calitative pentru deducerea mijloacelor de îmbunătățire a situației.

Exemple de calcul, cu aplicarea metodei și punerea în evidență a acestor avantaje vor fi date într-o lucrare viitoare.

## ANEXA I

**Aproximarea caracteristicilor dinamice ale mărimilor ce se introduc în reprezentarea sistemului**

S-a observat de mulți autori că de fapt, nu există două situații pentru aprecierea stabilității și anume „statică" și „dinamică", ci există ca situație caracteristică „deplasarea sistemului".

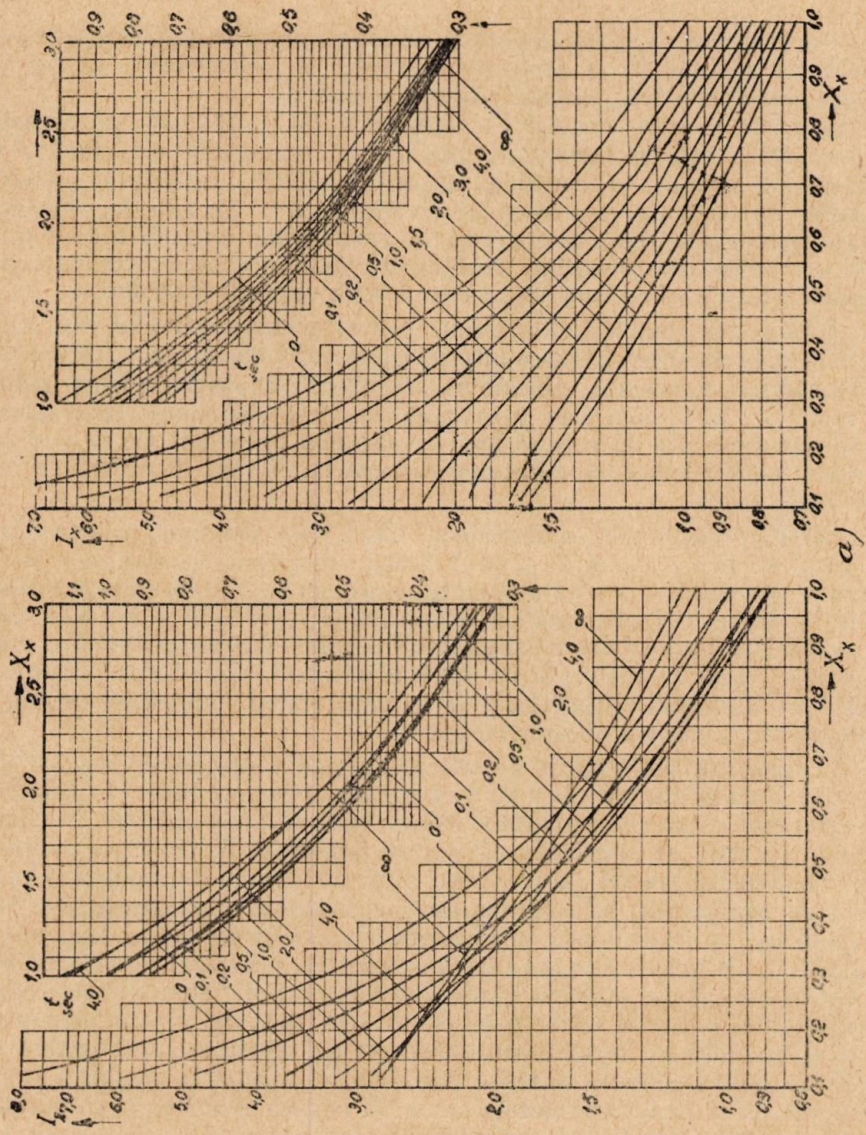
Limitele acestei situații caracteristice în problemele de stabilitate au fost alese pentru facilitatea unui calcul matematic în două situații extreme și anume: o extremă, așa-zisa astăzi „stabilitate statică" și cealaltă extremă, așa-zisa „stabilitate dinamică". În adevăr, stabilitatea statică este stabilitatea sistemului în cazul unor variații foarte mici și lente în deplasările rotorului. Stabilitatea dinamică este extrema cealaltă a mișcării rapide și cu cantități finite pentru unghiul rotorului.

Aceste presupuneri au fost făcute pentru a ușura calculul care într-un caz (static) presupune că starea internă a generatorului sincron, ținînd seama de reacțiunea indusului, rămîne neschimbată, deplasările fiind suficient de mici. În al doilea caz (dinamic) calculul presupune că deplasarea sistemului este atît de repede încît reacțiunea indusului nu se mai poate produce, toate fenomenele fiind determinate cu mărimi de calcul ce presupun acest lucru.

Aceste presupuneri conduc deci, după cum am spus, la introducerea în calcul în prima situație (a stabilității statice) a reactanțelor așa zise sincrone, sau de reacție a indusului împreună cu tensiunile corespunzătoare, iar în al doilea caz (dinamic) a reactanțelor tranzitorii apropiate de cele de scăpări împreună cu tensiuni considerate constante aplicate acestor reactanțe. Cum se întîmplă de fapt fenomenul atunci cînd intervine o schimbare în starea sistemului? Ce mărimi trebuie introduse atunci cînd se lucrează cu curenți de scurtcircuit?

În general, schimbările ce intervin sînt externe generatorului și sînt datorite unei schimbări bruște a caracteristicilor sarcinei. În general se aproximează aceste schimbări ale valorii sarcinei la schimbarea impedanței externe pe care se consideră că debita generatorul. În cazul schimbării unui element al rețelei (ieșirea unei linii de circuit de exemplu) pînă la sfîrșit se ajunge tot la schimbarea unei valori a unei impedanțe. Micșorarea bruscă a impedanței se încadrează de fapt în cazuri caracteristice de scurtcircuit în care sarcina activă și reactivă a mașinei se schimbă brusc. În asemenea cazuri variația curenților din mașinile sincrone s-au studiat experimental și există curbe gata construite (vezi fig. 7) atît pentru cazul în care mașinile au regulatoare automate de tensiune cît și pentru cazul cînd nu există asemenea aparate. Variația curentului în mașină s-ar putea considera că se face după aceste curbe, și pentru problemele de stabilitate în cazul cînd se utilizează curentul de scurtcircuit ca mărime de calcul.

Considerarea curentă în calcul a unei reactanțe constante și o tensiune constantă revine la considerarea unui curent de scurtcircuit constant în tot timpul schimbărilor externe ale circuitelor. Vedem deci că


a)
$X_x$
$I_x$
t sec

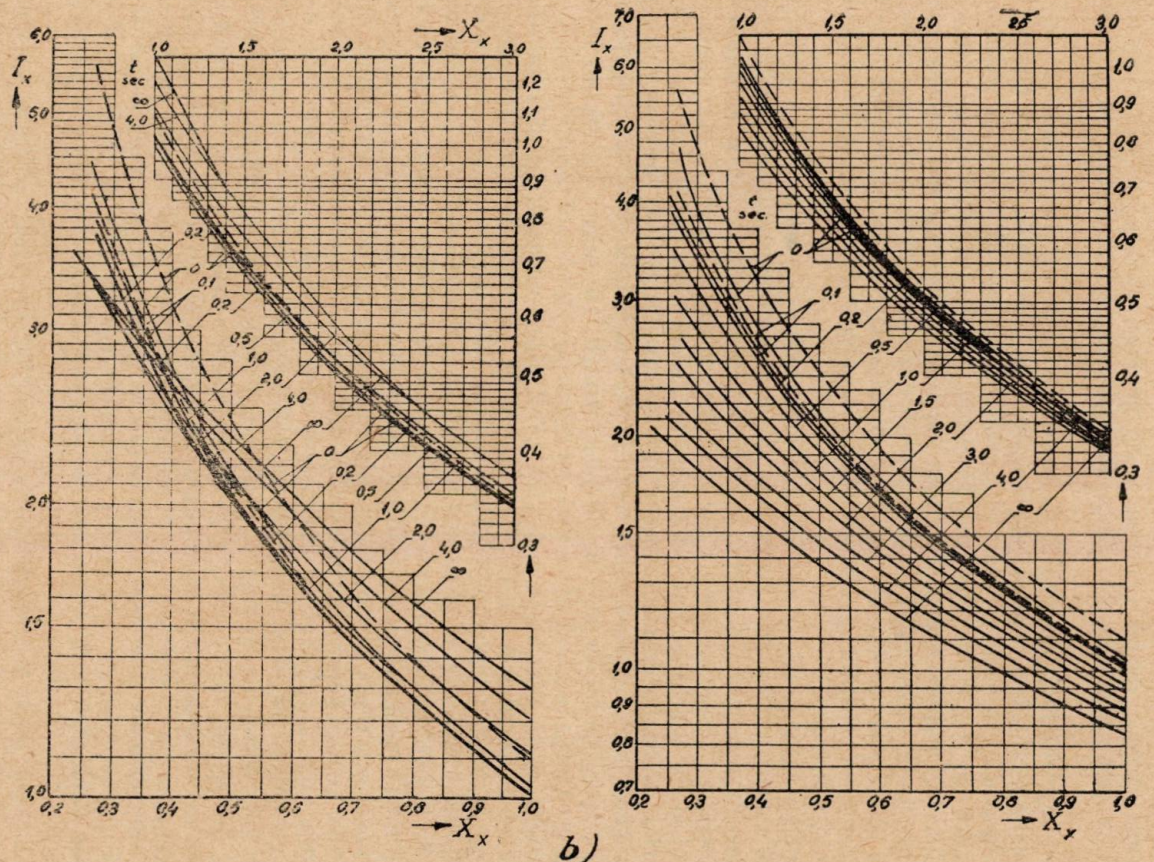



Fig. 7. — Curbele de scurtcircuit — după Ulianov

*a*) Generatorul hidraulic cu și fără reglajul excitației;

*b*) turbogenerator cu și fără reglajul excitației.

în cazul utilizării curenților de scurtcircuit s-ar putea aproxima variația în timp a elementelor după curbele de scurtcircuit predeterminate.

Mai trebuie însă observat că dacă se consideră curbele de variație a curenților de scurtcircuit în timp, gata construite pentru calculele de scurtcircuit, aceste curbe corespund în general unei stări de excitație maximă a generatorului, la plina lui sarcină, cu factorul de putere nominal.

Cum în problemele de stabilitate avem de multe ori de considerat alte stări pentru generatori, se vor putea aproxima curenții la diverse timpuri prin comparație cu aceste curbe tip, considerîndu-se că legea de variație a curenților în timp rămîne neschimbată și deci deducîndu-se valori proporționale. În afară de această aproximație mai intervine și o aproximație asupra unghiului curentului de scurtcircuit care variază față de axul rotorului, în timp, asupra căreia vom face considerații mai departe. Mai întîi însă să lămurim complet ipotezele simplificatoare ce se fac curent, în analiza stabilității dinamice.

O pierdere a stării de echilibru a sistemului din cauza unei variații bruște a configurației circuitelor sau a puterii consumatorilor produce o serie de oscilații care pot conduce sau nu, la pierderea stabilității. În timpul acestor oscilații intervin în realitate o serie de alte schimbări, ca : reglaje de puteri și de tensiune, noi schimbări în compoziția sarcinilor etc., etc. Complexitatea unui asemenea proces nu poate fi prinsă într-un calcul, și nici măcar într-o reprezentare matematică suficient de clară pentru a urmări cu ușurință fazele unei asemenea variații. De aceea s-a recurs la o simplificare fundamentală și anume se examinează numai prima oscilație a sistemului, și se consideră sistemul stabil dacă această primă oscilație nu conduce la pierderea stabilității. *Astfel, în calculele de stabilitate dinamică ce se fac deobicei se consideră sistemul stabil dacă fiecare din elementele ce au căpătat o mișcare se deplasează pînă la un maxim și apoi se întorc înapoi.* Se ia deobicei drept criteriu unghiul între două rotoare, unghi care crește indefinit dacă sistemul e instabil, sau crește pînă la o valoare maximă și apoi descrește dacă sistemul este stabil. Nu se insistă în manualele de specialitate asupra acestei aproximații a așa zisei „primei oscilații". În fond fenomenul este simplificat la maximum atît în ce privește mărimile de calcul ce se consideră, cît și însăși fenomenul fizic, recurgîndu-se la o imagine suficient de redusă ca elemente, pentru a putea fi reprezentată și determinată. În sfîrșit, e de observat că în aceste calcule nu se ține seama niciodată de componentele aperiodice ale curenților de scurtcircuit și nici de componentele periodice ale curenților rotorilor produse de aceasta. Această simplificare este admisibilă avînd în vedere timpul scurt de amortizare a acestei părți a procesului. *Calculele pas cu pas ce se fac pentru urmărirea deplasării sistemului sînt de fapt calculate de regimuri staționare succesive.*

Să trecem acum la considerarea elementelor de calcul în timpul acestei *„prime oscilații"* și să vedem cum s-ar putea determina problema prin considerarea directă a curenților de scurtcircuit ($YE$) pentru fiecare cale de curent, așa cum s-a propus aci în locul considerării separate a reactanțelor și tensiunilor, așa cum se face în mod general azi. Știm că în cazul

considerării separate a tensiunilor și reactanțelor se procedează în următoarele moduri după gradul de aproximație dorit:

1) Se consideră o reactanță constantă și o tensiune internă constantă în timpul acestei prime oscilații și anume tensiunea internă în mașină considerînd reactanța tranzitorie;

2) Se consideră o reactanță constantă și anume cea tranzitorie, dar se consideră o tensiune internă variabilă ca mărime și unghi față de rotor care se deduce din caracteristicile reglajului de tensiuni;

3) În sfîrșit, unii autori propun menținerea unei tensiuni constante, dar introducerea unei reactanțe, așa numite *reactanță de pendulare*, care să aibă o valoare constantă în timpul unui proces și mijlocie între începutul primei oscilații și sfîrșitul ei și să reproducă în calcul rezultate apropiate de un calcul exact, calcul care ar fi considerat atît variația tensiunii cît și a reactanței.

Dacă considerăm curenții de scurtcircuit, prin analogie se pot deduce trei moduri de a proceda și anume:

1) Se consideră un curent de scurtcircuit *constant* în timpul primei oscilații și anume curentul de scurtcircuit calculat cu reactanța tranzitorie (aceeași reactanță care se introduce și în calculele ce se fac curent prin considerarea reactanței și a tensiunii separat).

2) Se pornește de la curentul stabilit la 1).

Se urmărește cu ajutorul curbelor de decrement (fig. 7) variația în timp a curentului de scurtcircuit ca mărime și unghi.

3) Se consideră o valoare mijlocie a curentului de scurtcircuit în timpul primei pendulări a generatorului, valoare apreciată ținînd seama de timpul în care se desfășoară procesul și mărimea loviturii de putere.

Primul mod de a proceda este cel mai simplu și suficient de exact pentru cazul unor lovituri puternice (scurtcircuite apropiate de generatori) care conduc la o deplasare rapidă a rotorilor. Calculul pe această cale este în special justificat în cazurile limită, cînd sistemul și-a pierdut stabilitatea din cauza unei lovituri puternice. În cazurile cînd sistemul nu și-a pierdut stabilitatea, calculul pe această cale introduce de fapt aproximații mari. Avînd în vedere că în cazurile limită de stabilitate dinamică calculul este apropiat de realitate se poate justifica acest mod de a proceda.

Al treilea mod de a proceda cu un curent mijlociu de scurtcircuit este la fel de simplu și poate exprima orice situație.

Mărimea curentului ($EY$) de considerat în calcule trebuie considerat conform curbelor de decrement și dedus cu aceste curbe din valoarea inițială a curentului de scurtcircuit. Pentru stabilirea valorii inițiale a curentului de scurtcircuit e necesar bineînțeles să se țină seama de starea de încărcare a mașinii, adică de excitație reală a mașinii.

În ceea ce privește reducerea acestui curent inițial la valoarea mijlocie de calcul, care să fie introdusă în diagramă (fig. 7), se poate aproxima printr-o cale oarecare timpul aproximativ al primei pendulări. Din curbele de decrement se deduce apoi reducerea ce trebuie aplicată valorii inițiale a curentului de scurtcircuit pentru a obține un curent de scurtcircuit mijlociu ca mărime între valoarea inițială și cea finală la sfîrșitul primei pendulări.

Vom examina acum foarte pe scurt și cazul 2) în care s-ar considera un curent de scurtcircuit variabil în timp și care ar corespunde calculelor mai exacte ce se fac ținînd seama de variația tensiunii ca mărime și unghi.

În adevăr, calculul stabilității dinamice se poate face ținînd seama de variația tensiunii în fiecare moment atît ca valoare, cît și ca unghi. În ecuațiile ce stabilesc în metodele „pas cu pas" diferențele dintre puterile la arbori și puterile electrice, pentru fiecare generator în parte, intră pentru puterile electrice tensiunea din spatele reactanței tranzitorii $E'$. Această tensiune însă își schimbă unghiul în timpul mișcării față de axul rotorului iar valoarea ei în decursul timpului este condiționată de constantele de timp ale circuitelor și de variația curentului rotoric în cazul regulatorilor de tensiune.

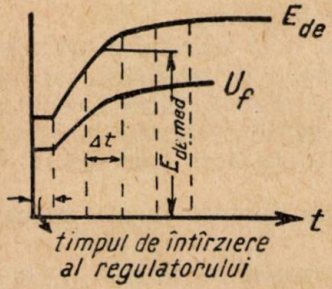



Fig. 8. — Variația tensiunii excitatrice și a f.e.m. staționară de mers în gol.

Calculul stabilității dinamice se face prin introducerea în calcul a acestei tensiuni variabile în fiecare interval de timp, interval ce se consideră în metodele de calcul obișnuite și așa zise „pas cu pas". Reamintim că aceste metode laborioase găsesc în introducerea variației tensiunei o greutate în plus.

Mai trebuie remarcat că la variația deplasării rotorilor, această tensiune variabilă arătată mai sus ($E'$) nu se poate considera legată rigid de rotor căci variația unghiului acestei tensiuni nu coincide cu variația unghiului rotorului. Unghiul rotorului variază identic cu unghiul forței electromotrice $E$, indicată mai sus, care este forța electromotrice de mers în gol a mașinei forța electromotrice cu o direcție fixă față de fluxul inductorului.

De aceia în calculul stabilității dinamice cu considerarea variației tensiunei, unghiul dintre rotoare, care ar trebui examinat este acesta din urmă, adică unghiul între forțele electromotoare de mers în gol ale mașinilor. Observăm că direcția acestor forțe electromotoare poate fi considerată aceeași cu a așa-zisei forță electromotoare după reactanța sincronă, în cazul liniarizării curbei de mers în gol a mașinii.

Din cele de mai sus ar rezulta următoarea metodă paralelă utilizînd curenții de scurtcircuit și ținînd seama de curba din figura 8 a variației în timp a tensiunii excitatricei:

1) Se deduc curenții de scurtcircuit permanenți corespunzători tensiunii interne respective a generatorului;

2) Pentru aceiași excitație se deduc curenții de scurtcircuit inițiali.

Pentru reducerea acestor două valori se pot aproxima valori proporționale cu cele deduse din curbele de variație a curentului de scurtcircuit în timp, („curbele de decrement").

O dată aceste valori deduse se pot construi simultan două diagrame cu ambii curenți de scurtcircuit, atît cu cel inițial, cît și cu cel permanent. Acest din urmă curent (permanent) urmează a fi utilizat numai pentru

mișcările rotorului și deducerea efectelor inerției, deplasările unghiului rotorilor putînd fi mai exact aproximate cu acest din urmă fel de reprezentare. Deducerea mărimilor electrice se va face cu valorile curenților de scurtcircuit inițial.

S-a indicat această cale de apreciere a stabilității dinamice cu variația tensiunii interne a generatorului numai pentru a arăta că sînt și aici posibilități similare cu cele utilizate în metodele curente. Nu socotim necesar să se utilizeze astfel de operații complicate într-o metodă care are ca principale calități : simplicitatea și rapiditatea calculului, cu vizionarea fenomenelor și nu ne vom opri mai mult asupra lor.

★

*În concluzie* pare potrivit pentru calcul pe această cale :

1) dacă deplasarea sistemului este foarte rapidă (lovituri puternice) să se considere în calculul de stabilitate dinamică curentul de scurtcircuit inițial corespunzător unei reactanțe foarte mici apropiată de cea tranzitorie ;

2) dacă deplasarea sistemului este lentă, loviturile de putere date mașinilor fiind relativ mici, atunci să se aproximeze în calcul o valoare intermediară a curentului de scurtcircuit (valoare de pendulare) cuprinsă între valoarea curentului de scurtcircuit inițial și cel permanent.

Atît în cazul 1) cît și în cazul 2) va trebui să se verifice că în adevăr sistemul este stabil după „liniștire" deci o verificare a stabilității statice care se va face cu curentul de scurtcircuit permanent, sau cu un vector dedus din considerarea reactanței de regim permanent ($YE$).

Înainte de a încheia mai trebuie observat că vectorul $YE$, asimilat cu un curent de scurtcircuit permanent, comportă unele erori în cazul cînd se consideră saturația, erori care pot avea importanță în anumite situații. În adevăr, în cazul cînd situația ce se examinează corespunde unei tensiuni $U$ coborîte pe bara pe care se face diagrama, atunci atît în evaluarea curentului de scurtcircuit permanent cît și în evaluarea directă a admitanței și separat a tensiunii trebuie să se considere mașina în regim nesaturat și nu este vorba de nici o aproximație specială deoarece curenții de scurtcircuit se calculează în general, presupunînd mașina în regim nesaturat.

Dacă însă tensiunea barei este ridicată, atunci curentul de scurtcircuit ce se introduce pe diagramă s-ar putea să corespundă mai departe reactanței mașinei tot în regim nesaturat, deoarece corespunde tensiunii $U = 0$ pe bară ; în realitate poate fi vorba de o reactanță mai mult sau mai puțin corespunzătoare unui regim saturat. Cum calculul cu reactanțe nesaturate este acoperitor se poate considera pur și simplu, curentul de scurtcircuit corespunzător reactanței totale din curbele de decrement tot așa cum în calcule de stabilitate statică se consideră de multe ori reactanța sincronă în regim nesaturat. Bineînțeles tensiunea internă care se deduce din reactanța ce s-a introdus în calcul este întotdeauna cea care reproduce regimul de funcționare respectiv al generatorului.

## ANEXA II

**Curbele timpului fictiv $\tau$ pentru diverse unghiuri inițiale ale mașinii sincrone**

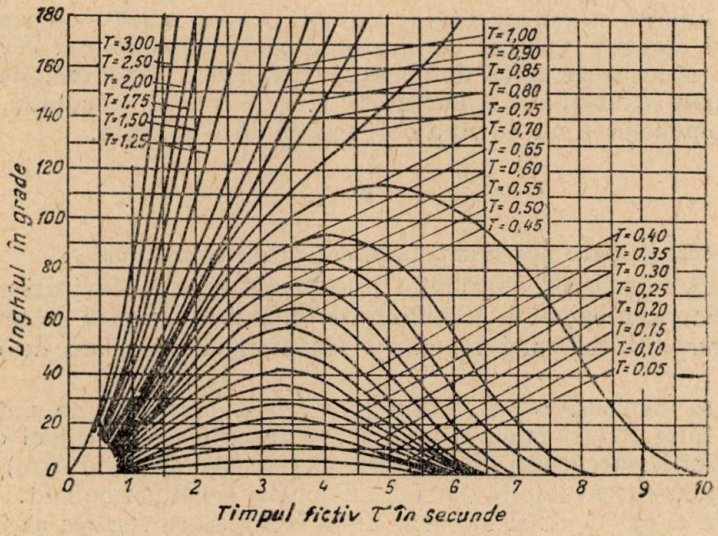



Fig. I

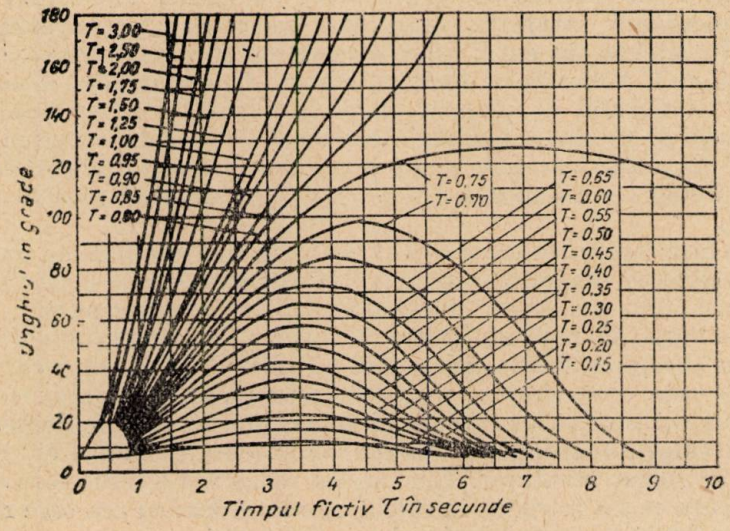



Fig. II

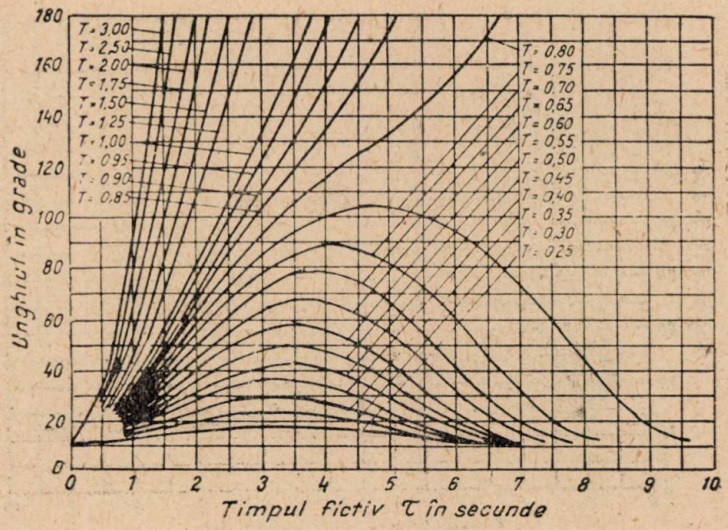



Fig. III

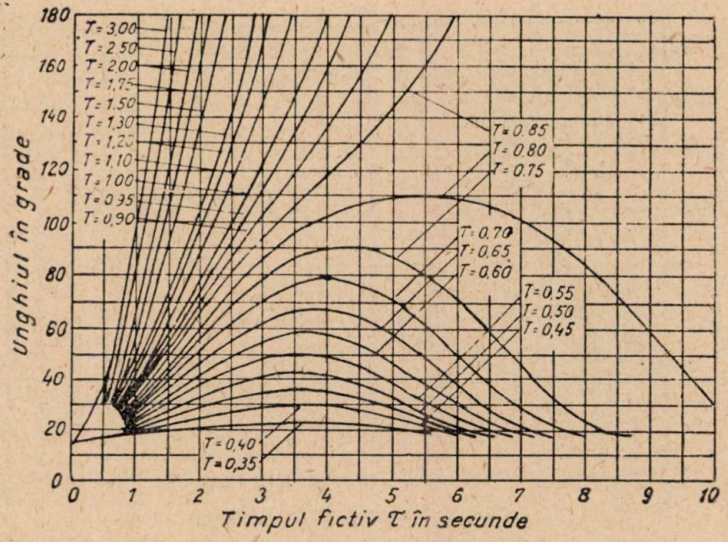



Fig. IV

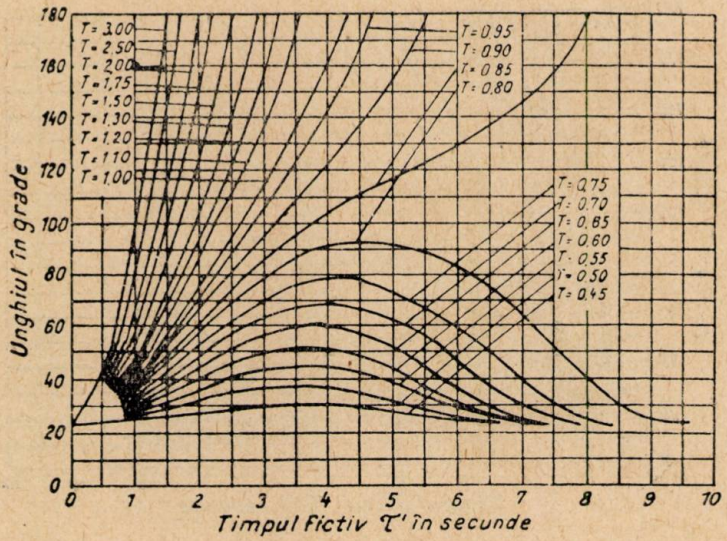

Unghiul în grade
Timpul fictiv τ' în secunde
T = 3.00
T = 2.50
T = 2.00
T = 1.75
T = 1.50
T = 1.30
T = 1.20
T = 1.10
T = 1.00
T = 0.95
T = 0.90
T = 0.85
T = 0.80
T = 0.75
T = 0.70
T = 0.65
T = 0.60
T = 0.55
T = 0.50
T = 0.45

Fig. V

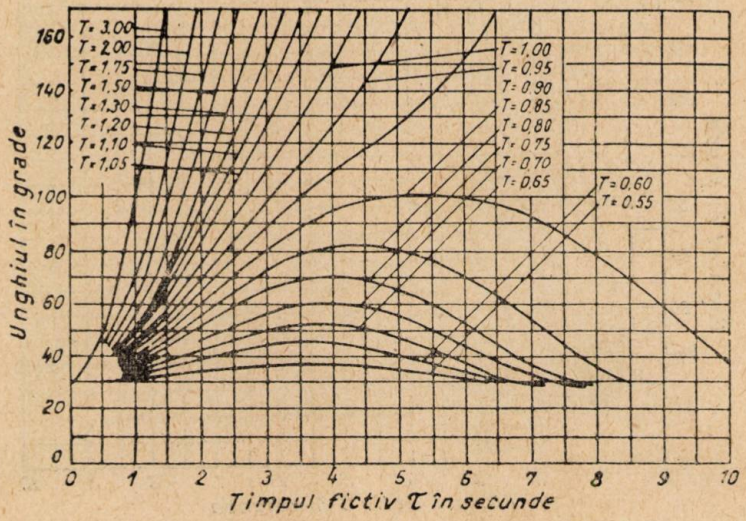

Unghiul în grade
Timpul fictiv τ în secunde
T = 3.00
T = 2.00
T = 1.75
T = 1.50
T = 1.30
T = 1.20
T = 1.10
T = 1.05
T = 1.00
T = 0.95
T = 0.90
T = 0.85
T = 0.80
T = 0.75
T = 0.70
T = 0.65
T = 0.60
T = 0.55

Fig. VI

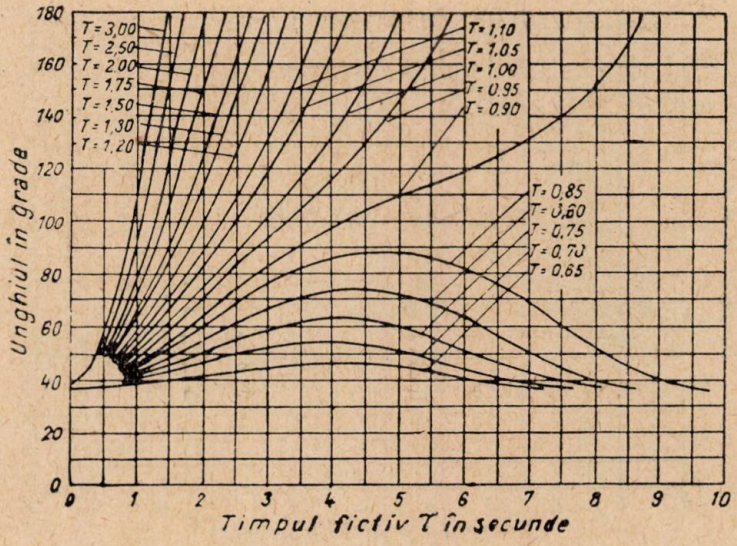



Fig. VII

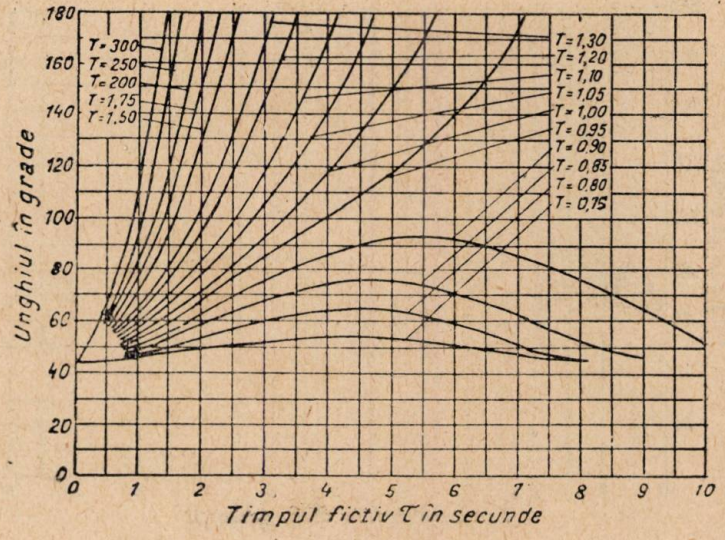



Fig. VIII

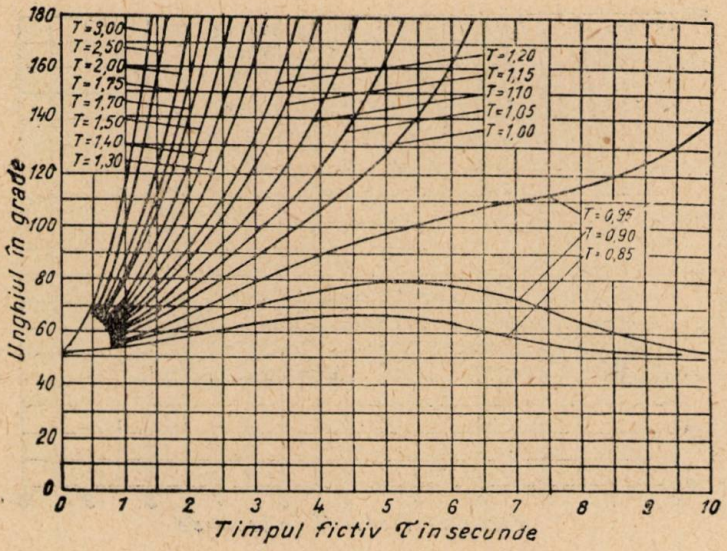

Unghiul în grade
Timpul fictiv τ în secunde
T = 3,00
T = 2,50
T = 2,00
T = 1,75
T = 1,70
T = 1,50
T = 1,40
T = 1,30
T = 1,20
T = 1,15
T = 1,10
T = 1,05
T = 1,00
T = 0,95
T = 0,90
T = 0,85

Fig. IX

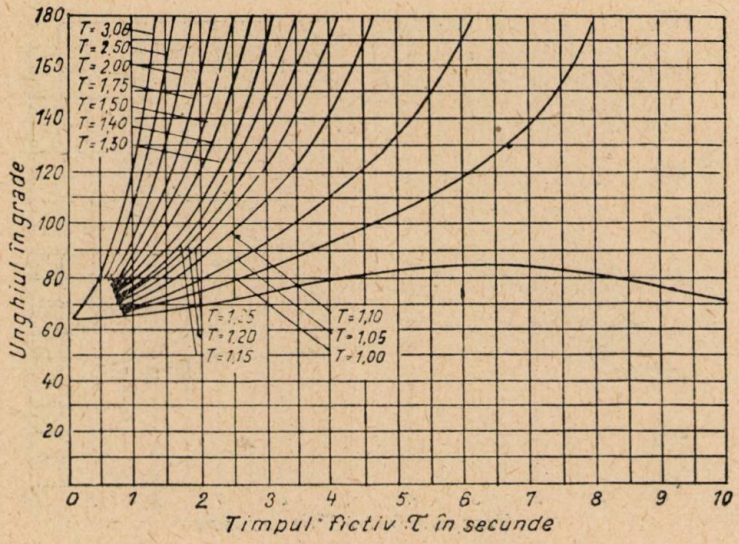

Unghiul în grade
Timpul fictiv τ în secunde
T = 3,00
T = 2,50
T = 2,00
T = 1,75
T = 1,50
T = 1,40
T = 1,30
T = 1,25
T = 1,20
T = 1,15
T = 1,10
T = 1,05
T = 1,00

Fig. X

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЕДИНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ К ИССЛЕДОВАНИЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ (ПРИ ПОМОЩИ ГРАФИКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ)

## (КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Автор использует метод эквивалентного единого потребителя, ранее применявшийся при исследовании статической устойчивости, для исследования динамической устойчивости энергетической системы.

Метод состоит в установлении соотношения между токами короткого замыкания генераторов, снабжающих током распределительную шину с одним потребителем, в зависимости от испытаний активной и реактивной мощности генераторов. Показывается, что всякое внезапное изменение системы может быть представлено на графике поворотом осей координат.

Путем графического определения изменений мощности $\Delta P$ каждой группы этой системы с использованием уравнения равновесия

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = \Delta P$$

получаются последовательно изменения углов электродвижущей силы генераторов по отношению к напряжению на шине. Можно таким образом проследить на диаграмме изменения углов во времени и определить, является ли система динамически устойчивой или нет.

Изложенный метод представляет преимущества в том, что касается быстроты расчета и наблюдения за динамическим процессом во времени.

## ОБЪЯСНЕНИЯ РИСУНКОВ

Рис. 1. — Кривая $P = f(U)$ вокруг точки (a) при различных значениях напряжения.

Рис. 2. — Внутренние напряжения $E_{mi}$ и $E_{mp}$, соответствующие переходному режиму и постоянному режиму.

Рис. 3. — $a$ — система с двумя электростанциями; $b$ — уменьшенная система; $c$ — изображение векторами короткого замыкания.

Рис. 4. — Нагрузка, к нтура и синхронные двигатели. Вектор $O_2O_3$ представляет синхронный двигатель, эквивалентный соответствующей нагрузке, поглощающей активную мощность $P_m$ и реактивную мощность $y_sU^2$.

Рис. 5. — Внезапные изменения в состоянии генераторов.

Рис. 6. — Три последовательные состояния перемещения роторов во времени.

Рис. 7. — Кривые короткого замыкания по Ульянову. $a$ — гидравлический генератор с регулированием и без регулирования возбуждения; $b$ — турбогенератор с регулированием и без регулирования возбуждения.

Рис. 8. — Изменение возбуждающего напряжения и стационарно электродвижущей силы на холостом ходу.

# APPLICATION DE LA MÉTHODE DU CONSOMMATEUR UNIQUE À L'ÉTUDE DE LA STABILITÉ DYNAMIQUE DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES (À L'AIDE DES GRAPHIQUES DE COURT-CIRCUIT)

(RÉSUMÉ)

L'auteur applique la méthode du consommateur unique équivalent, qu'il avait utilisée auparavant à l'étude de la stabilité statique, pour étudier la stabilité dynamique d'un système énergétique.

La méthode consiste à établir les relations entre les courants de court-circuit des générateurs débitant sur la barre d'un consommateur unique, en fonction des puissances active et réactive des générateurs. On voit que tout changement brusque dans le système peut être représenté sur le graphique par une rotation des axes des coordonnées.

Par déduction graphique des variations de puissance $\Delta P$ de chaque groupe du système et en utilisant l'équation d'équilibre

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = \Delta P$$

on obtient, de proche en proche, les variations des angles des f.é.m. des générateurs par rapport à la tension de la barre unique. De cette manière, on peut suivre sur le diagramme la variation des angles au cours du temps et, par conséquent, en déduire que le système est dynamiquement stable ou non.

Les avantages de cette méthode sont ceux de la rapidité du calcul et de l'observation visuelle du développement du processus dynamique au cours du temps.

## EXPLICATION DES FIGURES

Fig. 1. — Courbe $P = f(U)$ autour d'un point ($a$) et pour diverses valeurs de la tension.

Fig. 2. — Les tensions intérieures $E_{mi}$ et $E_{m'p}$, correspondant au régime transitoire et au régime permanent.

Fig. 3. — $a$) Système à deux centrales ; $b$) système réduit ; $c$) représentation par des vecteurs de court-circuit.

Fig. 4. — La charge contient des moteurs synchrones. Le vecteur $O_2O_3$ représente le moteur synchrone équivalent de la charge respective, qui absorbe une puissance active $P_m$ et une puissance réactive $y_s U^2$.

Fig. 5. — Modifications brusques de l'état des générateurs.

Fig. 6. — Trois états successifs du déplacement des rotors au cours du temps.

Fig. 7. — Les courbes de court-circuit, selon Oulianov.
$a$) Générateur hydraulique avec et sans réglage de l'excitation ; $b$) turbogénérateur avec et sans réglage de l'excitation.

Fig. 8.— La variation de la tension excitatrice et de la f.é.m. stationnaire de marche à vide.

## BIBLIOGRAFIE

1. P. Dimo, *O cale nouă pentru aprecierea stabilității.* Studii și cercetări de energetică, t. V, nr. 1—2, 1955, p. 159.
2. F. Manea, *Studiul comparativ al unei noi căi de apreciere a stabilității statice a sistemelor electrice.* Studii și cercetări de energetică, t. V, nr. 3—4, 1955, p. 423.

STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ
Tomul VI, nr. 4, 1956

*ELECTROENERGETICĂ ŞI ELECTROTEHNICĂ*

# AUTOMATIZĂRI CU MAŞINI ELECTRICE CUPRINZÎND REACŢII POZITIVE CALCULATE PRIN METODA FRECVENŢELOR*)

DE

DOREL DAMSKER

## INTRODUCERE

Lucrarea de faţă face parte dintr-un ciclu de studii, prin care se expun metode proprii de calcul al acţionărilor electrice automatizate cu maşini amplificatoare, bazate pe analiza sistemelor prin funcţii de transfer şi caracteristicile de frecvenţă. Obiectul principal al studiului care urmează este tratarea grafico-analitică a sistemelor automatizate cu maşini electrice cuprinzînd reacţii pozitive. Se stabilesc criterii de interpretare a reacţiilor pozitive după nomogramele de calcul cunoscute pentru reacţia negativă, precum şi reguli de stabilitate pentru asemenea sisteme. Prin analiza unei scheme clasice se arată utilitatea concluziilor la care s-a ajuns.

Prin acelaşi exemplu se ilustrează modalitatea de rezolvare a unor probleme specifice maşinilor electrice. Astfel, se tratează luarea în considerare, în mod riguros, a căderilor de tensiune din maşinile electrice prin funcţii de transfer, se stabileşte funcţia de transfer a maşinii electrice regulatoare cu autoexcitaţie serie (rototrolul), se stabilesc funcţiile de transfer ale verigii generator-motor, pentru motorul sub sarcină, sistemul de reglaj cuprinzînd reacţii de tensiune şi curent; se arată cum se poate calcula procesul tranzitoriu la intervenţia bruscă a unui curent de sarcină. La întocmirea calculelor grafice şi numerice am fost ajutat de R. Fleischer, N. Bichir şi C. Păiuş, cărora le mulţumesc.

---

*) Lucrare prezentată Institutului de energetică la data de 18 aprilie 1956.

## 1. TRANSPUNEREA NOMOGRAMELOR DE CALCUL PENTRU CIRCUITELE ÎNCHISE PRIN REACȚIE POZITIVĂ

Automatizările cu mașini electrice cuprind adesea circuite închise prin reacție pozitivă, care îndeplinesc funcția de amplificare sau de compundare

Este necesar să dispunem de aceleași mijloace de calcul pentru reacția pozitivă, ca și pentru reacția negativă. Din analiza formul lor de legătură între circuitul închis și cel deschis, pe de o parte, prin reacție negativă și, pe de altă parte, prin reacție pozitivă se pot obține r gulile de transpunere ale nomogramelor. Notăm caracteristica de amplitudine — fază a circuitului deschis

$$KW\ (j\omega) = H\ (\omega)\ e^{j\theta(\omega)}, \tag{1.1}$$

iar a circuitului închis :

$$\Phi(j\omega) = A(\omega)\ e^{j\varphi(\omega)} \tag{1.2}$$

În relațiile de mai sus, $H(\omega)$, $A(\omega)$ sînt funcțiile caracteristice amplitudine-frecvență, iar $\theta(\omega)$, $\varphi(\omega)$ sînt funcțiile caracteristice fază-frecvență pentru circuitul deschis și respectiv închis.

Vom afecta funcțiile corespunzătoare circuitului închis prin reacție negativă (respectiv pozitivă) cu semnul minus (respectiv plus). Se cunosc relațiile [1]

$$KW_-\ (j\omega) = H_-\ (\omega)\ e^{j\theta_-(\omega)} = \frac{\Phi_-\ (j\omega)}{1_-\Phi_-(j\omega)} = \frac{A_-\ (\omega)\ e^{j\varphi_-(\omega)}}{1 - A_-\ (\omega)^{j\varphi_-(\omega)}}. \tag{1.3}$$

Pentru reacția pozitivă este valabilă relația

$$\Phi_+\ (j\omega) = \frac{KW_+\ (j\omega)}{1 - KW_+(j\omega)} = \frac{H_+\ (\omega)\ e^{j\theta_+(\omega)}}{1 - H_+(\omega)e^{j\theta_+(\omega)}} \tag{1.4}$$

Relațiile (1.3) și (1.4) sînt identice ca formă matematică numai că trebuie să se țină seama de corespondența între caracteristica de amplitudine-frecvență $H_+$ cu $A_-$ și a caracteristicii fază-frecvență $\theta_+$ cu $\varphi_-$. Această observație ne va servi să folosim „harta lui Nichols" (nomograma XI din [2]) pentru circuitele închise prin reacție pozitivă. Presupunem că se cunoaște $H_+\ (\omega)$ și $\theta_+\ (\omega)$ și se cere să aflăm grafic $A_+\ (\omega)$ și $\varphi_+\ (\omega)$. Pentru aceasta,vom trasa curba caracteristicii logaritmice de amplitudine frecvență a sistemului deschis, $L_m\ H_+\ (\theta)$, pe nomograma lui Nichols urmărind valorile în dB și grade după rețeaua de curbe din planul semilogaritmic. Vom citi valorile lui $L_m\ A_+$ și $\varphi_+$ după axele de coordonate, deci invers față de procedeul urmat pentru reacția negativă (se obișnuiește a se nota valoarea în decibeli cu simbolul $L_m$ pus înaintea mărimii).

Această metodă poate da loc la confuzii. De aceea, este mai nimerit să se lucreze cu o nomogramă transpusă special pentru reacția pozitivă, astfel ca pe axele de coordonate să menținem valorile caracteristice amplitudine-frecvență $L_m H_+\ (\omega)$ și fază-frecvență $\theta_+\ (\omega)$ ale circuitului deschis.

La baza construirii rețelelor de curbe $L_m A = 20 \log_{10} A = \text{const.}$ și $\varphi = \text{const.}$, care formează nomograma pentru reacția negativă, stau formulele [1]:

$$H_-(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2\cos\varphi_-}{A} + \frac{1}{A^2}}}, \tag{1.5}$$

$$\theta_-(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{\sin\varphi_-}{\cos\varphi_- - A}. \tag{1.6}$$

Pentru reacția pozitivă formulele corespunzătoare sînt

$$H_+(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2\cos\varphi_+}{A} + \frac{1}{A^2}}} \tag{1.7}$$

$$\theta_+(\omega) = \operatorname{arctg} \frac{\sin\varphi_+}{\cos\varphi_+ + A}. \tag{1.8}$$

În relațiile de mai sus, toate mărimile sînt funcții de frecvența unghiulară $\omega$.

Dacă în ecuațiile (1.5) și (1.6) menținem aceeași valoare pentru $A$ și înlocuim pe $\theta_-$ și $\varphi_-$ cu valorile

$$\begin{aligned} \theta_- &= -180° - \theta_+ \\ \varphi_- &= -180° - \varphi_+ \end{aligned} \tag{1.9}$$

găsim pentru ambele serii de ecuații $H_- = H_+$. Aceasta înseamnă că schimbînd pe nomograma reacției negative valorile lui $\theta$ și $\varphi$, conform relațiilor (1.9), găsim nomograma valabilă pentru circuitele *închise* prin reacție pozitivă. Figura 5 reprezintă nomograma cu indicii lui $\theta$ și $\varphi$ schimbați în mod corespunzător, astfel că introducînd valorile lui $L_m H$ în dB și ai lui $\theta$ în grade ale sistemului deschis, pentru un anumit $\omega$, după cele două axe de coordonate, se găsește un punct în plan, căruia îi corespunde un $L_m A$ și $\varphi$ (citite după rețeaua de curbe a nomogramei) care sînt amplitudinea și faza pentru același $\omega$ ai circuitului închis prin reacție pozitivă.

Și celelalte nomograme uzuale în calculele grafico-analitice ale proceselor tranzitorii pot fi ușor transpuse pentru reacția pozitivă. Dacă se scriu relațiile de bază, care definesc diagramele circulare reale și imaginare (nomogramele I și III din [2]) atît pentru reacția negativă, cît și pentru cea pozitivă, se obține

$$P(\omega) = \frac{KU(\omega)\cdot[1 \pm KU(\omega)] \pm K^2V^2(\omega)}{[1 \pm KU(\omega)]^2 + K^2V^2(\omega)}, \tag{1.10}$$

$$Q(\omega) = \frac{KV(\omega)}{[1 \pm KU(\omega)]^2 + K^2V^2(\omega)}. \tag{1.11}$$

În relațiile de mai sus, în locurile unde s-a pus semnul dublu trebuie, să se considere semnul plus pentru reacția negativă și minus pentru reacția pozitivă. E suficient să facem observația că luînd semn invers pentru partea reală a caracteristicii amplitudine-fază a sistemului deschis ($KU$) și pentru indicii cercurilor $P_c$ se obțin diagramele circulare pentru reacția pozitivă.

De cele mai multe ori caracteristica amplitudine-fază a sistemului deschis este cunoscută sub forma $L_m H\ (\omega)$ ca o funcție de $\theta$ în grade. Pentru construirea nomogramelor care ne dau pe $P(\omega)$ și $\varphi(\omega)$, plecînd de la aceste caracteristici, vom examina relațiile pe baza cărora s-au trasat curbele din nomogramele IX și X din [2].

$$P(\omega) = \frac{KH \cos\theta \pm K^2H^2}{K^2H^2 \pm 2\,KH \cos\theta + 1}, \tag{1.12}$$

$$Q(\omega) = \frac{K \sin\theta}{K^2H^2 \pm 2\,KH \cos\theta + 1}, \tag{1.13}$$

(semnele minus corespund reacției pozitive). Deci, în nomogramele cunoscute pentru reacția negativă este suficient a se considera $\theta_+ = -180° - \theta_-$ și să se schimbe semnul indicilor curbelor $P_c = \text{const}$.

Nomogramele transpuse pentru reacția pozitivă au fost anexate la sfîrșitul lucrării (planșele I—IV).

## 2. REGULILE DE CONSTATARE A STABILITĂȚII SISTEMELOR ÎNCHISE PRIN REACȚII POZITIVE

Presupunem că funcția de transfer a sistemului deschis, după înlocuirea lui $s = j\,\omega$, este $W(j\,\omega)$, adică $K = 1$. Fie funcția $\psi\ (j\,\omega)$, determinată de relația

$$\psi(j\,\omega) = 1 - W\,(j\,\omega). \tag{2.1}$$

Se presupune că circuitul deschis este stabil și deci $W(j\,\omega)$ nu are poli în semiplanul drept (sistemele închise pr n reacții pozitive, care au circuitul deschis instabil, sînt totdeauna instabile). Aplicînd criteriul lui Mihailov sau teorema lui Cauchy, se demonstrează la fel ca pentru reacția negativă, că sistemul închis este stabil, dacă funcția $\psi\ (j\,\omega)$ în planul complex nu cuprinde originea coordonatelor. Curba $W(j\,\omega)$ se obține din $\psi\ (j\,\omega)$, dacă coordonatele fiecărui punct al lui $\psi\ (j\,\omega)$ își schimbă semnul și la abscisă se adaugă $+1$ (fig. 1). În cazul în care curba închisă $\psi\ (j\omega)$ nu cuprinde originea, atunci $W(j\,\omega)$ nu cuprinde punctul $(+1, j0)$ și invers. În figura 1, $\psi\ (j\omega)$ cuprinde originea.

De aici rezultă următoarea regulă: un sistem închis prin reacție pozitivă este stabil, dacă sistemul deschis este stabil, iar caracteristica amplitudine-fază a acestuia din urmă nu cuprinde punctul $(+1, j0)$.

Este ușor de văzut că sistemele cuprinzînd elemente de integrare, închise prin reacție pozitivă, sînt totdeauna instabile. Pentru asemenea

sisteme, caracteristica amplitudine-fază a sistemului deschis devine infinit de mare la $\omega = 0$ și cuprinde totdeauna punctul $(+1, j0)$.

Pentru interpretarea comodă a criteriului lui Nyquist la sisteme închise prin reacție pozitivă, atunci cînd se lucrează cu caracteristicile logaritmice de frecvență, să stabilim reguli analoge cu cele cunoscute pentru reacția negativă. În cazul în care caracteristica logaritmică de fază-frecvență a sistemului deschis la creșterea lui $\omega$ traversează o singură dată

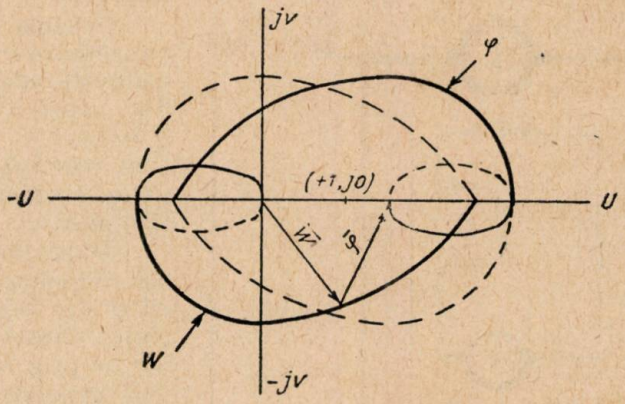



Fig. 1. — Reprezentarea legăturii între funcțiile $\psi(j\omega)$ și $W(j\omega)$

axa $\theta = 0°$, atunci caracteristica logaritmică amplitudine-frecvență trebuie să fie negativă ($L_m H < 0$), pentru aceeași frecvență pentru care are loc intersec ia cu axa 0°. În acest caz sistemul închis este stabil. Atunci cînd caracteristica logaritmică de fază-frecvență a sistemului deschis traversează axa $\theta = 0°$ de mai multe ori, atunci numărul de traversări de sus în jos trebuie să fie egal cu numărul de traversări de jos în sus, numărînd traversările pentru care amplitudinea logaritmică este mai mare ca 0dB. În acest caz, sistemul închis este stabil.

### 3. METODA FUNCȚIILOR DE TRANSFER LA CALCULUL SISTEMELOR AUTOMATE CU MAȘINI ELECTRICE CUPRINZÎND REACȚII POZITIVE CU LUAREA ÎN CONSIDERARE A CĂDERILOR DE TENSIUNE DIN MAȘINILE ELECTRICE

Deoarece expuneri de principiu ale metodelor în acest domeniu sînt foarte greu de urmărit, vom utiliza un exemplu, pentru a pune în evidență utilitatea nomogramelor stabilite la punctul 2, precum și pentru a expune o metodă proprie de utilizare a funcțiilor de transfer la automatizările cu mașini electrice de putere relativ mare, pentru a lua în considerare în mod corect specificul acestor sisteme ca încărcarea motorului și căderile de tensiune din mașini.

În figura 2 este reprezentată schema principială a reglajului vitezei unui motor de curent continuu alimentat de un generator separat. Ca excitatrice și regulator servește mașina amplificatoare cu autoexcitație

serie (rototrol). Descrierea funcționării și studiul proceselor tranzitorii prin ecuații diferențiale pentru asemenea scheme au fost tratate de mai mulți autori [3], [4], [5]. Vom face studiul aceleiași scheme, prin metoda funcțiilor de transfer și a caracteristicilor logaritmice de frecvență.

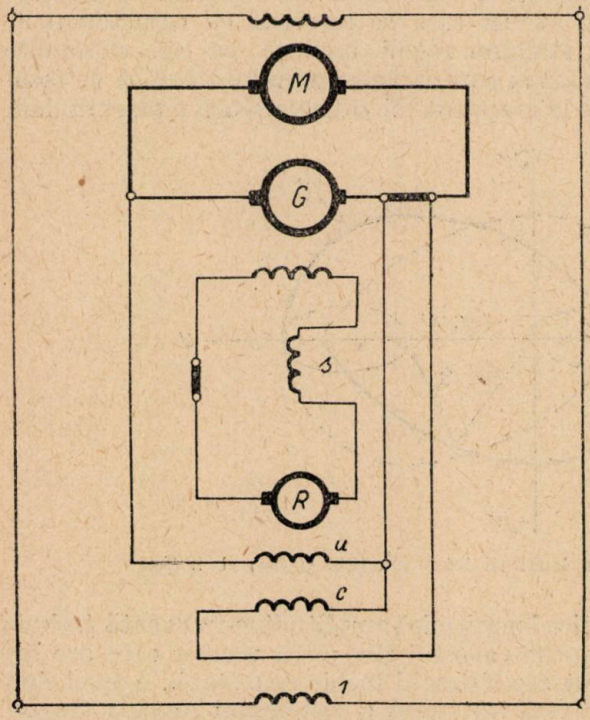



Fig. 2. — Schema principială a reglajului vitezei cu rototrol.

Schema bloc corespunzătoare schemei principiale este redată în figura 3. S-a notat cu semnul + și semnul −, linia de legătură reactivă, pentru a se pune în evidență felul reacției, pozitivă sau negativă.

După cum se vede ușor atît din schema principială, cît și din schema bloc reglajul vitezei motorului se obține prin reglarea tensiunii generatorului și prin compensarea căderii de tensiune din motor prin reacție pozitivă de curent. Pentru precizia și rapiditatea reglajului se utilizează un rototrol simplu, care se prezintă ca un ge-

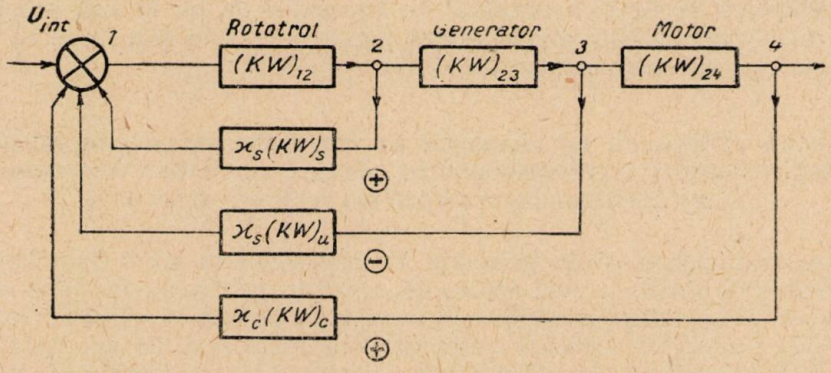



Fig. 3. — Schema bloc corespunzătoare schemei din figura 2.

nerator construit special, dotat cu patru înfășurări de excitație și anume înfășurarea *1* pentru magnetizare independentă, înfășurarea *s* de autoexcitație serie, înfășurarea *u* pentru reacție de tensiune și înfășurarea *c* pentru reacția de curent.

Constanta de timp a oricăreia dintre înfășurările de excitație a rototrolului, ținînd seama de inductanțele mutuale, este :

$$T_\Sigma = T_1 + T_s + T_c + T_u, \tag{3.1}$$

unde $T_1$, $T_s$, $T_c$, $T_u$ sînt constantele de timp ale înfășurărilor de excitație cu același indice, luînd în considerare numai inductanța proprie a circuitului de excitație.

Funcția de transfer a dinamului regulator (cu circuitul de autoexcitație deschis) este

$$(KW)_{12} = \frac{e_r(s)}{u_{in}(s)} = \frac{K_r}{1 + T_\Sigma s}, \tag{3.2}$$

unde $e_r(s)$ este imaginea Laplace a f.e.m. a rototrolului, $u_{in}(s)$ este imaginea tensiunii de excitație la înfășurarea *1*, $K_r$ este coeficientul static de amplificare al dinamului fără autoexcitație.

Să calculăm acum funcția de transfer a rototrolului cu autoexcitație, pe care o notăm $\Phi_{12}(s)$, adică a primului circuit închis prin reacție pozitivă. Aceasta va fi dată de expresia

$$\Phi_{12}(s) = \frac{(KW)_{12}}{1 - \varkappa_s (KW)_{12} (KW)_s}. \tag{3.3}$$

În relația precedentă $\varkappa_s$ este factorul de adaptare la înfășurarea *1*, a tensiunii aplicate înfășurării $s$, adică $u_s$ [6].

$$\varkappa_s = \frac{W_s}{W_1} \cdot \frac{R_1}{r_s}, \tag{3.4}$$

iar $(KW)_s$ este funcția de transfer a circuitului de reacție

$$(KW)_s = \frac{u_s}{e_r}. \tag{3.5}$$

Pentru a găsi pe $u_s$, să determinăm impedanța operațională a înfășurării de excitație serie, ținînd seama de inductanțele mutuale între înfășurările de pe aceiași poli magnetici. Fie aceasta $Z_s(s)$ :

$$Z_s(s) = r_s\, s\, l_\Sigma = r_s(1 + sT_\Sigma) \tag{3.6}$$

Impedanța operațională a întregului circuit este

$$Z_t(s) = R_s + sL_s = R_s(1 + sT_e), \tag{3.7}$$

unde s-a notat cu $T_e$ constanta de timp a întregului circuit. Rezultă pentru raportul

$$(KW)_s = \frac{u_s}{e_r} = \frac{Z_s \cdot i_e}{e_r} = \frac{Z_s \frac{e_r}{Z_t}}{e_r} = \frac{Z_s}{Z_t} = \frac{r_s(1 + sT_\Sigma)}{R_s(1 + sT_e)}. \tag{3.8}$$

Introducînd relaţiile (3.4), (3.8) în (3.3), pentru funcţia de transfer a regulatorului, se obţine

$$\Phi_{12}(s) = \frac{\dfrac{K_r}{1 + T_\Sigma s}}{1 - \dfrac{W_s}{W_1} \cdot \dfrac{R_1}{R_s} \cdot \dfrac{K_r}{(1 + T_e s)}} . \tag{3.9}$$

Funcţia de transfer a circuitului deschis între punctele *1* şi *3* (fig. 3) este

$$(KW)_{13} = \Phi_{12}\,(KW)_{23}, \tag{3.10}$$

unde $(KW)_{23}$ este funcţia de transfer a generatorului şi are expresia

$$(KW)_{23} = \frac{K_g}{1 + T_e s} . \tag{3.11}$$

Înlocuind-o în relaţia (3.10) se găseşte

$$(KW)_{13} = \frac{\dfrac{K_r}{1 + T_\Sigma s} \cdot \dfrac{K_g}{1 + T_e s}}{1 - \varkappa_{st} \dfrac{K_r}{1 + T_e s}} . \tag{3.12}$$

În ecuaţia de mai sus s-a notat

$$\varkappa_{st} = \frac{W_s}{W_1} \cdot \frac{R_1}{R_s} . \tag{3.13}$$

Presupunem, pentru început, că nu există cuplu static. La închiderea circuitului de reacţie să ţinem seama de căderea de tensiune din generator în timpul procesului tranzitoriu. Se consideră schema echivalentă a verigii generator-motor, ca în figura 4.

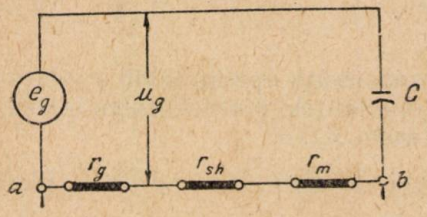



Fig. 4. — Schema echivalentă a grupului generator-motor.

S-a pus în evidenţă f.e.m. a generatorului şi rezistenţele circuitului, motorul s-a înlocuit cu o capacitate $C$. Valoarea acestei capacităţi se găseşte exprimînd egalitatea constantelor de timp ale circuitului echivalent şi ale motorului

$$CR_t = T_m, \tag{3.14}$$

unde : $R_t = r_g + r_{sh} + r_m$ , iar $r_g$, $r_{sh}$, $r_m$ sînt rezistenţele generatorului motorului şi rezistenţa şunt de măsură a curentului. Impedanţa operaţională a circuitului are expresia

$$Z_{gm} = R_t + \frac{1}{C_s} . \tag{3.15}$$

Raportul $\frac{U_{g_0}}{e_g}$ poate fi calculat:

$$\frac{u_{g_0}}{e_g} = \frac{e_g - r_g\, i_{m_0}}{e_g} = \frac{e_g - r_g \dfrac{e_g}{R_t + \dfrac{1}{Cs}}}{e_g} \tag{3.16}$$

unde $i_{m_0}$ este curentul motorului în cazul lipsei cuplului static.

Să luăm raportul de mai sus ca o funcție de transfer

$$(KW)_{31} = \frac{u_{g_0}}{e_g} = \frac{1 + T'_m\, s}{1 + T_m\, s}, \tag{3.17}$$

unde s-a notat

$$T'_m = \frac{R_t - r_g}{R_t} \cdot T_m. \tag{3.18}$$

Funcția de transfer a sistemului închis de reglare a tensiunii, în cazul inexistenței cuplului static, va fi:

$$\Phi_{13}(s) = \frac{(KW)_{13}}{1 + \varkappa_u (KW)_{13}\, KW_{31}} \tag{3.19}$$

În cazul existenței cuplului static, prin rezistențele circuitului echivalent generator-motor circulă, pe lîngă curentul $i_{m_0}(s)$, și un curent corespunzător sarcinii, $i_s(s)$. În acest caz originea de timp, pentru curentul $i_{m_0}$ și viteză, nu mai este aceiași cu cea pentru f.e.m. a generatorului. Totuși, pentru simplificarea calculului, se consideră apariția curentului de sarcină, chiar la originea timpului. În acest caz, în circuitul reacției de tensiune se trimite tensiunea

$$u_g(s) = e_g(s) - r_g\, [i_{m_0}(s) + i_s(s)]. \tag{3.20}$$

Tensiunea de eroare la intrarea regulatorului va fi

$$u_\varepsilon(s) = u_{\text{in}}(s) - \varkappa_u\, u_g(s). \tag{3.21}$$

Rezultă

$$e_g = \frac{(KW)_{13}\, [u_{\text{in}}(s) + \varkappa_u r_g\, i_s(s)]}{1 + \varkappa_u (KW)_{13}\, KW_{31}} = \Phi_{13}(s)\, [u_{\text{in}}(s) + \varkappa_u r_g\, i_s(s)] \tag{3.22}$$

Prin urmare, se poate considera că pentru motorul încărcat, funcția de transfer a circuitului de reglare a tensiunii este aceeași ca și pentru motorul funcționînd în gol, însă semnalul de intrare se modifică.

Tensiunea la periile generatorului are funcția de transfer

$$u_g = \frac{(KW)_{13}\, (KW)_{31}\, [u_{\text{in}}(s) + \varkappa_u\, r_g\, i_s(s)]}{1 + \varkappa_u\, (KW)_{13}\, (KW)_{31}} - r_g\, i_s(s) =$$

$$= \frac{(KW)_{13}\, (KW)_{31}}{1 + \varkappa_u (KW)_{13}\, (KW)_{31}}\, u_{\text{in}}(s) - \frac{r_g\, i_s(s)}{1 + \varkappa_u\, (KW)_{13}\, (KW)_{31}}. \tag{3.23}$$

În continuare se consideră, ca mărime de ieșire, curentul principal din circuitul generator-motor.

În lipsa curentului de sarcină, expresia căutată a curentului dinamic este

$$i_{m0}(s) = \frac{e_g(s)}{Z_{gm}(s)} = \frac{e_g(s)}{R_t + \frac{1}{Cs}} = \frac{e_g(s)\, T_m\, s}{R_t(1 + T_m s)}. \tag{3.24}$$

De aici rezultă funcția de transfer a motorului $(KW)_{34}$, avînd ca mărime de intrare f.e.m. a generatorului și ca mărime de ieșire curentul în lipsa sarcinii

$$(KW)_{34} = \frac{i_{m0}(s)}{e_g(s)} = \frac{T_m\, s}{R_t(1 + T_m s)}. \tag{3.25}$$

Funcția de transfer a sistemului de reglare a curentului, considerînd circuitul deschis, este

$$(KW)_{14} = \frac{i_{m0}(s)}{\varepsilon(s)} = \Phi_{13}(s).\ (KW)_{34}. \tag{3.26}$$

În circuitul de reacție intră tensiunea : $r_{sh}\ i_{m0}(s)$, care trebuie redusă la circuitul principal de excitație al rototrolului, prin înmulțire cu factorul de adaptare $\varkappa_c$.

Rezultă funcția de transfer a sistemului închis

$$\Phi_{14}(s) = \frac{\Phi_{13}(s)\,(KW)_{34}}{1 \pm \varkappa_c\, \Phi_{13}(s)\,(KW)_{34}\, r_{sh}} = \frac{(KW)_{14}}{1 \pm \varkappa_c\, r_{sh}\,(KW)_{14}}. \tag{3.27}$$

În cazul existenței curentului de sarcină, curentul principal din circuitul generator-motor se modifică din $i_{m0}$ la o nouă valoare $i_{m1}(s)$ datorită creșterii f.e.m. a generatorului, ca urmare a reglajului de tensiune. La această valoare se adaugă curentul de sarcină, astfel că în total curentul din circuitul generator-motor este

$$i_m(s) = i_{m1}(s) + i_s(s). \tag{3.28}$$

La intrarea sistemului deschis, avem semnalul

$$\varepsilon(s) = u_{\text{in}}(s) + \varkappa_u r_g\, i_s(s) - \varkappa_c\, r_{sh}\,[i_{m1}(s) + i_s(s)]. \tag{3.29}$$

La ieșirea sistemului vom găsi curentul, pe care îl provoacă f.e.m. a generatorului în circuitul generator-motor

$$i_{m1} = (KW)_{14}\,\varepsilon(s). \tag{3.30}$$

Prin calcule simple se deduce valoarea totală a curentului în circuitul generator-motor, în cazul încărcării motorului

$$i_m(s) = \frac{(KW)_{14}}{1 \pm \varkappa_c\, r_{sh}\,(KW)_{14}}\,[u_{\text{in}}(s) + \varkappa_u r_g\, i_s(s)] + \frac{i_s(s)}{1 \pm \varkappa_c\, r_{sh}\,(KW)_{14}}. \tag{3.31}$$

În relațiile de mai sus, în locul unde este semn dublu, trebuie considerat semnul superior pentru reacția negativă și semnul inferior pentru reacția pozitivă.

Să trecem de la expresia curentului principal la expresia vitezei motorului. Pentru aceasta ne vom referi la ecuația de echilibru a tensiunilor din circuitul generator-motor

$$e_g(s) - e_m(s) = i_m(s)\, R_t. \tag{3.32}$$

Dacă înmulțim cu $K_v$ toți termenii egalității de mai sus, se găsește expresia

$$n(s) = K_v\, e_g(s) - K_v\, R_t\, i_m(s). \tag{3.33}$$

Pentru a cunoaște dependența vitezei $n(s)$, în funcție de semnalul de comandă $u_{in}(s)$ și de perturbație $i_s(s)$, este necesar a înlocui, în relația (3.33), expresiile lui $e_g(s)$ și $i_m(s)$ în funcție de aceleași semnale.

În sistemul închis de reglare a tensiunii intră semnalele $u_{in}(s) + \varkappa_u r_g\, i_s(s)$, conform relației (3.22), dar și semnalul $\mp \varkappa_c\, r_{sh}\, i_m(s)$ necesar închiderii circuitului de reglare a curentului, încît f.e.m. a generatorului are expresia

$$e_g(s) = \Phi_{13}(s)\,[u_{in}(s) + \varkappa_u r_g\, i_s(s) \mp \varkappa_c\, r_{sh}\, i_m(s)]. \tag{3.34}$$

După unele calcule, expresia vitezei se poate scrie astfel:

$$n(s) = K_v\, \Phi_{13}(s)\, \frac{1 - R_t\,(KW)_{14}}{1 + \varkappa_c\, r_{sh}\,(KW)_{14}} \cdot [u_{in}(s) + \varkappa_u\, r_g\, i_s(s)] + \\ + K_v\, \frac{[\mp \Phi_{13}\, \varkappa_c\, r_{sh} - R_t]\, i_s(s)}{1 \pm \varkappa_c\, r_{sh}\,(KW)_{14}}. \tag{3.35}$$

Formula vitezei, după relația (3.35), se va putea simplifica, dacă se vor introduce condițiile pe care trebuie să le îndeplinească sistemul în regimul staționar.

Expresiile finale, care ne interesează în studiul calității sistemului, sînt imaginile după transformarea Laplace a curentului principal, relația (3.31), și a vitezei, relația (3.33).

O metodă de analiză a calității constă în a considera semnalul de comandă $u_{in}(s)$ și perturbația $i_s(s)$ ca fiind de forma funcției în treaptă, și se calculează procesul tranzitoriu. Pentru aceasta este necesar a se introduce în relațiile finale, în locul funcțiilor de transfer, expresiile lor în funcție de parametrii circuitelor sistemului. Apoi urmează a se utiliza teorema dezvoltării, pentru a se trece la funcțiile originale de timp.

Dar unul din avantajele principale ale metodei expuse mai sus este faptul că forma matematică a funcțiilor de transfer se pretează la metoda mai comodă a calculului grafic, prin caracteristicile logaritmice de frecvență, apoi la analiza calității sistemului, prin „metoda frecvențelor" și la calculul procesului tranzitoriu, prin metoda caracteristicii reale de frecvență. Aceasta este obiectul punctelor ce urmează.

## 4. ANALIZA CALITĂȚII SISTEMULUI ÎN REGIM DINAMIC

Înainte de a se întocmi calculele grafico-analitice, pentru obținerea caracteristicilor de frecvență, pe baza cărora se face analiza calității, este necesar a se determina parametrii tuturor circuitelor. Cu ajutorul datelor tehnice ale mașinilor alese în prealabil, se determină rezistențele și numărul de spire ale înfășurărilor de excitație.

Criteriile care duc la precizarea tuturor parametrilor, sînt următoarele :

*a*) coeficientul de mărire a amplificării statistice, prin autoexcitație serie la rototrol ;

*b*) coeficientul de forțare a excitației ;

*c*) condiția ca în regim staționar viteza motorului să nu depindă de valoarea curentului de sarcină.

Dacă se alege, pentru mărirea amplificării la rototrol, valoarea $\gamma$ atunci

$$\lim_{s \to 0} \Phi_{12}(s) = K_{12}^{0} = \gamma K_{r} . \tag{4.1}$$

Din această relație se determină valoarea rezistenței $R_s$ .

Forțarea excitației conduce la răspunsuri rapide și la precizii de reglaj mai mari, căci cu cît coeficientul de forțare este mai mare, cu atîta rezistențele din circuitele înfășurării de comandă și de tensiune ale rototrolului sînt mai mici, deci amplificările mai mari. Dacă se alege coeficientul $\alpha$ de forțare a excitației, rezultă relația

$$AS_1 = \frac{\alpha}{\alpha - 1} AS_u , \tag{4.2}$$

unde $AS_1$ și $AS_u$ sînt amperspirele înfășurărilor de comandă și de tensiune. Din egalitatea de mai sus se stabilește o relație condițională între rezistențele $R_1$ și $R_u$.

Din relația (3.35), considerînd $u_{in}(s) = U_{in}/s$ și $i(s) = I_s/s$, înmulțind cu $s$ și trecînd la limită pentru $s = 0$, se obține următoarea condiție pentru regimul staționar

$$N = K_v K_{13}^{0} [U_{in} + \varkappa_u r_g I_s] + K_v [K_{13}^{0} \varkappa_c r_{sh} - R_i] \cdot I_s . \tag{4.3}$$

În relația de mai sus $N$ este viteza staționară în rot/min, iar $I_s$ curentul de sarcină constantă în amperi. Pentru a obține ca în regim staționar viteza motorului să nu depindă de sarcină, deci să fi mereu egală cu viteza de mers în gol, este necesar să fie îndeplinită condiția

$$K_{13}^{0} \cdot [\varkappa_u r_g + \varkappa_c r_{sh}] = R_i . \tag{4.4}$$

Din egalitatea de mai sus rezultă o relație condițională între rezistențele $R_i$, $r_h$ și $R_c$. Luînd valori arbitrare pentru unele rezistențe, se deduc toate celelalte. În lucrarea [6] am dat toate detaliile de calcul.

Calculele grafico-analitice, a căror expunere urmează, au fost făcute cu următoarele valori numerice:

— constantele de timp: ale circuitelor de comandă $T_\Sigma = 0{,}047\ s$, ale circuitului de excitație generator $T_e = 0{,}105\ s$, electromecanică $T_m = 0{,}25\ s$, $T'_m = 0{,}143\ s$;

— rezistențele circuitului principal de comandă $R_1 = 360\ \Omega$, de tensiune $R_u = 1800\ \Omega$, de curent $R_c = 66{,}5\ \Omega$, de excitație serie $R_s = 57{,}2\ \Omega$, de măsură $r_{sh} = 0{,}05\ \Omega$, a circuitului generator-motor $R_t = 0{,}308\ \Omega$;

— factorii de adaptare pentru circuitul reacției de tensiune $\varkappa_u = 0{,}4$, de autoexcitare $\varkappa_s = 0{,}8$, de curent $\varkappa_c = 2{,}03$;

— factorii de amplificare pentru generator $K_g = 1{,}97$, pentru rototrol $K_v = 1{,}015$, pentru motor $K_v = 2{,}27$.

Pentru analiza calității sistemului în regim dinamic, la o primă evaluare, este suficient a aprecia felul în care se prezintă caracteristicile amplitudine-frecvență și fază-frecvență ale sistemului închis, la procesul tranzitoriu de comandă, motorul fiind neîncărcat.

În planșa V s-au trasat curbele corespunzătoare rototrolului.

Curba *1* și *2* reprezintă caracteristica logaritmică amplitudine-frecvență și caracteristica fază-frecvență, pentru expresia $\dfrac{1}{1 + 0{,}105\, j\omega}$.

Curba *3* reprezintă caracteristica $20 \log 0{,}8 = -1{,}94$ dB.

Curbele *4* și *2* sînt caracteristicile logaritmice ale sistemului deschis. care se închide prin circuitul de reacție pozitivă al autoexcitației serie. Ne vom folosi de considerațiile generale stabilite în punctul 2. În primul rînd, vom remarca faptul că regula de stabilitate, pentru circuitele închise prin reacție pozitivă, este îndeplinită. Într-adevăr, amplitudinea $L_m H$ a sistemului deschis (curba *4*) rămîne mereu inferioară valorii 0 dB. Urmează că sistemul închis va fi stabil. Conform celor stabilite, vom afla caracteristicile logaritmice de frecvență ale sistemului închis. Pentru aceasta trasăm prin puncte caracteristica logaritmică de amplitudine-fază a sistemului deschis pe nomograma reacției pozitive (curba cu linia groasă din figura 5). Pentru fiecare punct s-a notat frecvența. Se citesc, prin interpolare, valorile $L_m A$ și $\varphi$ corespunzătoare fiecărui punct de frecvență cunoscută. Astfel, s-au obținut:

Curba *5* și *6*: caracteristicele logaritmice amplitudine-frecvență și fază-frecvență ale expresiei

$$\frac{\dfrac{0{,}8}{1 + 0{,}105\, j\omega}}{1 - \dfrac{0{,}8}{1 + 0{,}105\, j\omega}}.$$

Pentru a ajunge la caracteristicile funcției $\Phi_{12}$ s-a continuat prin metoda de însumare grafică (expusă amănunțit în [6]).

Continuînd calculul după aceeași metodică, utilizînd unele artificii simple, s-au construit și caracteristicile de frecvență ale tuturor mărimilor de ieșire din fiecare element. În planșa VI s-au trasat curbele rezultante.

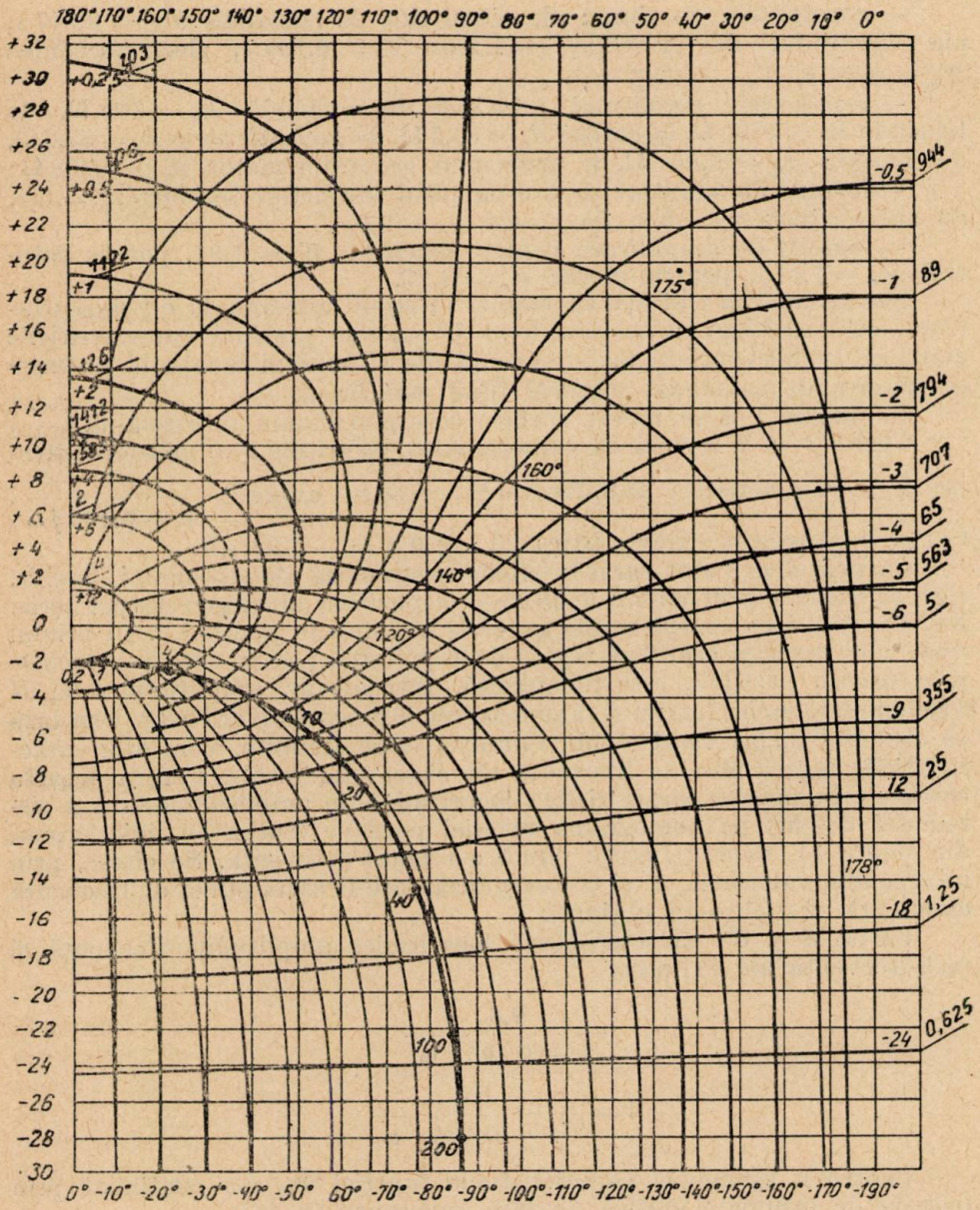



Fig. 5. — Reacţia pozitivă a rototrolului.

În această planșă curbele *1* și *2* sînt corespunzătoare amplitudinii și fazei f.e.m. a generatorului *3* și *4* curentului principal, *5* și *6* vitezei motorului.

Urmărind alura curbelor caracteristice se pot face următoarele aprecieri:

— Sistemul este stabil. Într-adevăr, s-a controlat fiecare circuit închis în parte și s-a constatat că este stabil. Dat fiind că circuitele închise, anterioare în lanțul de circuite, erau stabile, s-a putut aplica pe rînd criteriul simplu de stabilitate al lui Nyquist, fie pentru reacție negativă, fie pentru reacție pozitivă, după cum a fost cazul. Criteriul lui Nyquist s-a aplicat sub forma regulii pentru caracteristici logaritmice.

— La un semnal de comandă în formă de treaptă sistemul admite o valoare staționară constantă. Se remarcă din planșa VI că pentru $\omega \to 0$ se obține ca amplitudine valoarea asimptotică + 13,2 dB. Dacă la intrare se va da semnalul în treaptă de 220 V, se va obține ca valoare finală, pentru viteză, $n = 1000$ rot/min.

— Caracteristica logaritmică amplitudine-frecvență, pentru viteză (ca și cea pentru curent), prezintă un vîrf foarte accentuat, care ne arată că procesul tranzitoriu la semnalul de comandă dă naștere unor puternice oscilații prelungite cu suprareglaj mare și cu un vîrf de curent inadmisibil.

Durata de stabilizare după care este atinsă pentru prima dată viteza finală este aproximativ $\tau_{st} = \frac{\pi}{\omega_t}$, unde $\omega_t$ este frecvența de tăiere.

În cazul nostru, am lucrat tot timpul cu factori de amplificare, avînd dimensiuni. Frecvența de tăiere este frecvența la care caracteristica logaritmică amplitudine-frecvență intersectează axa 13,2 dB. Durata de stabilizare este aproximativ $\tau_{st} = 0{,}21$ *s*.

Durata de stabilizare este mică, datorită coeficientului de forțare însemnat egal cu 5.

În concluzie, deși sistemul este stabil, totuși favorizează oscilațiile și nu admite ca semnalul de comandă de 220 V să fie aplicat brusc sub forma unei funcții în treaptă.

## 5. PROCESUL TRANZITORIU LA VARIAȚIA BRUSCĂ A CURENTULUI DE SARCINĂ

De fapt, schema analizată de noi nu este a unui sistem de comandă și nu este prevăzută pentru reglarea automată a procesului tranzitoriu provocat de semnalul de comandă. Pînă acum cercetătorii unor scheme analoge s-au ocupat numai de acest proces tranzitoriu [3] și [7]. Dar scopul real al schemei analizate este menținerea constantă a vitezei, încît este mult mai rațional să urmărim procesul tranzitoriu la variația bruscă a curentului de sarcină.

Rezolvarea grafico-analitică a problemei, pe care ne-o punem, ne dă prilejul să arătăm într-un caz concret, aplicarea metodei frecvențelor la construirea procesului tranzitoriu.

În relația (3.35) considerăm semnalul de comandă zero, astfel ca să obținem expresia perturbației vitezei datorită curentului de sarcină

$$\Delta n(s) = K_v \Phi_{13}(s) \frac{1 - R_t (KW)_{14}}{1 - \varkappa_c r_{sh} (KW)_{14}} \varkappa_u r_g i_s(s) + \\ + K_v \frac{\Phi_{13} \varkappa_c r_{sh} - R_t}{1 - \varkappa_c r_{sh} (KW)_{14}} i_s(s). \tag{5.1}$$

Ținînd seama de condiția (4.4), expresia de mai sus se poate pune sub forma

$$\frac{\Delta n(s)}{i_s(s)} = \frac{\dfrac{K_v R_t}{1 - \varkappa_c r_{sh} (KW)_{14}}}{\dfrac{K_{13}^0}{\Phi_{13}(s)\{1 - K_{13}^0 (KW)_{14} \varkappa_u r_g\}}} \cdot \\ 1 - \frac{K_{13}^0}{\Phi_{13}(s)\{1 - K_{13}^0 (KW)_{14} \varkappa_u r_g\}} \tag{5.2}$$

Această funcție de transfer poate fi tratată cu ajutorul caracteristicilor logaritmice de frecvență, utilizînd metoda de calcul stabilită de noi la punctul 2.

Calculele grafice s-au executat conform planșei VII.

În această planșă semnificația curbelor este următoarea:

Curbele *1* și *2*: caracteristicile logaritmice amplitudine-frecvență și fază-frecvență ale lui $(KW)_{14}$;

Dreapta *3*: $20 \log_{10} \varkappa_c r_{sh} = -19{,}9$ db;

Curba *4*: reprezintă $L_m H$, pentru $\varkappa_c r_{sh} (KW)_{14}$;

Curbele *5* și *6*: caracteristicile expresiei $\dfrac{\varkappa_c r_{sh} (KW)_{14}}{1 - \varkappa_c r_{sh} (KW)_{14}}$;

Dreapta *7*: reprezintă $20 \log_{10} K_v R_t = -3{,}1$ dB;

Dreapta *8*: reprezintă $20 \log_{10} K_{13}^0 \varkappa_u r_g = -19{,}54$ dB;

Curba *9*: reprezintă caracteristica $L_m H$, pentru $K_{13}^0 (KW)_{14} \varkappa_u r_g$;

Curbele *10* și *11*: caracteristicile expresiei:

$$\frac{K_{13}^0 (KW)_{14} \varkappa_u r_g}{1 - K_{13}^0 (KW)_{14} \varkappa_u r_g};$$

Dreapta *12*: reprezintă $20 \log_{10} K_{13}^0 = 6$ dB;

Curbele *13* și *14*: caracteristicile funcției $\Phi_{11}(s)$;

Curbele *15* și *16*: caracteristicile expresiei

$$\frac{K_{13}^0}{\Phi_{13}(s)\{1 - K_{13}^0 (KW)_{14} \varkappa_u r_g\}};$$

Curbele *17* și *18* : caracteristicile numitorului funcției de transfer (5·2);

Curbele *19* și *20* : caracteristicile logaritmice ale funcției de transfer

$$\frac{\Delta n\,(j\omega)}{i_s\,(j\omega)}\,.$$

Este interesant de remarcat că pentru $\omega = \infty$ ($t = 0$) amplitudinea are o valoare diferită de zero și anume $20 \log_{10} K_v R_t = 3{,}1$ dB. Aceasta înseamnă că la apariția bruscă a curentului de sarcină sub forma unei funcții în treaptă, viteza motorului suferă o cădere tot atît de bruscă: $\Delta n_s = K_v R_t I_s$.

Acest rezultat matematic este în concordanță cu schema echivalentă reprezentată în figura 4 și cu admisiunea simplificatoare asu ra originei comune de timp, pentru curentul de sarcină și f.e.m. a generatorului. În realitate, curentul de sarcină nu se stabilește brusc și nici căderea de viteză corespunzătoare nu are loc instantaneu.

Durata stabilirii curentului de sarcină este scurtă și luarea în considerație a acestei durate ar fi complicat foarte mult calculele. În ipoteza admisă de noi, procesul tranzitoriu conduce la perturbații de viteză mai mari, încît calculul este acoperitor, dacă se neglijează procesul tranzitoriu de stabilire a curentului de sarcină și se presupune apariția lui sub forma funcției în treaptă.

Funcția de transfer a căderii de viteză în raport cu sarcina nu are poluri în semiplanul drept al variabilei complexe $s$. În acest caz procesul tranzitoriu, la un semnal în treaptă, se poate calcula [1], [2], [8], [9], după formula:

$$\Delta n(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{P(\omega) \sin \omega t}{\omega}\, d\omega\,, \tag{5.3}$$

unde $P(\omega)$ este caracteristica reală proprie de frecvență și $i(s)$ a fost considerat $\frac{1}{s}$. Dispunem de caracteristicile logaritmice de frecvență ale lui $\Delta\, n(s)$, conform planșei VII. Pentru a afla grafic curba $P\ (\omega)$, am folosit nomograma XII din [2].

Caracteristica reală (planșa VIII), prezintă o asimptotă diferită de zero, pentru $\omega \to \infty$. Separarea în trapeze se face simplu, conform aceleiași planșe. Rămîne un dreptunghi de latură $P_\infty = 0{,}68$, care se întinde la infinit. Aceasta poate fi tratată ca și oricare caracteristică reală dreptunghiulară, ținînd seama că se prelungește la infinit.

Dreptunghiul care se întinde la infinit poate fi luat în considerație și astfel. Dacă se modifică axa absciselor planului, caracteristicii reale, astfel ca să se confunde cu asimptota, atunci axa timpului în planul pro-

cesului tranzitoriu se translatează cu aceeași valoare. Într-adevăr, schimbarea axei absciselor ne dă relația

$$P(\omega) = P'(\omega) - P_\infty . \tag{5.4}$$

Introducînd-o în relația (5.3), obținem

$$\Delta n(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\{P'(\omega) - P_\infty\} \sin \omega t}{\omega} d\omega = \\ = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{P'(\omega) \sin \omega t \, d\omega}{\omega} - P_\infty . \tag{5.5}$$

Conform egalității de mai sus, urmează să aflăm curba procesului tranzitoriu pentru caracteristica $P'(\omega)$ cu asimptotă zero și să scădem constanta $P_\infty = 0{,}68$.

Curba $P'(\omega)$ este împărțită în 8 trapeze (planșa IX).

Fiecare trapez s-a tratat conform regulilor stabilite de Solodovnikov. S-a calculat pentru fiecare, valoarea $\varkappa = \frac{\omega_d}{\omega_0}$, unde $\omega_d$ este frecvența la care se frînge latura superioară a trapezului și $\omega_0$ frecvența la care se intersectează axa absciselor. Pentru fiecare trapez s-au citit, din tabelele anexate la lucrarea [2], valorile $h_\varkappa(t)$ pentru diferite valori ale lui $t$. Valorile lui $t$ au fost recalculate după raportul $t' = \frac{t}{\omega_0}$ și valorile lui $h_\varkappa$ au fost recalculate după produsul $h'_\varkappa = r_{0i}$, unde $r_{0i}$ este înălțimea trapezului de ordin $i$. Cu ajutorul valorilor $h_\varkappa$ și $t'$ s-au trasat curbele din planșa X. În această planșă curbele *1* pînă la *8* corespund trapezelor cu același număr. Din însumarea geometrică a ordonatelor a rezultat curba procesului tranzitoriu (curba $\Delta n$).

Din desfășurarea procesului tranzitoriu se vede că abaterea cea mai mare de la viteza impusă este la începutul procesului tranzitoriu, cînd căderea de viteză este egală cu cea din sistemul generator-motor fără reacții (cu circuitul deschis). Pentru curentul nominal al motorului această abatere este de 5,7%. Dacă s-ar fi luat în considerație apariția bruscă a cuplului de sarcină, abaterea ar fi fost mai mică. Durata pînă la prima revenire a vitezei la valoarea impusă este de 0,06 s.

Scopul exemplului numeric tratat de noi a fost ilustrarea importanței pe care o are tratarea reacției pozitive pe calea caracteristicilor logaritmice de frecvență. În cursul desfășurării calculelor aceluiași exemplu, nomogramele stabilite de noi în prima parte a lucrării au fost utilizate de nenumărate ori, cu folosul înlăturării calculelor analitice foarte laborioase.

# АВТОМАТИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МАШИНАМИ ПРИ НАЛИЧИИ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ, ВЫЧИСЛЕННЫЕ ПО МЕТОДУ ЧАСТОТ

## (КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ)

Настоящая работа является частью цикла исследований, в связи с которыми излагаются методы расчета автоматизированного электрического запуска усиливающими машинами, основанного на анализе систем при помощи переходных функций и характеристик частоты. Предметом настоящей работы является графико-аналитический подход к исследованию систем с положительными реакциями, автоматизированных электрическими машинами. Устанавливаются критерии толкования положительных реакций по расчетным номограммам, применяемым к отрицательным реакциям, а также правила устойчивости подобных систем. Путем анализа классической схемы показывается польза выводов, к которым пришел автор.

На том же примере указывается способ разрешения некоторых вопросов, специфических для электрических машин. Рассматривается строгий учет падений напряжения в электрических машинах посредством переходных функций, устанавливается переходная функция регулирующей электрической машины с последовательным самовозбуждением (рототрол). Устанавливаются переходные функции звена мотор-генератор для двигателя под нагрузкой, система регулировки с реакциями напряжения и тока; показывается способ расчета переходного процесса при внезапном вхождении тока нагрузки.

## ОБЪЯСНЕНИЕ РИСУНКОВ

Рис. 1. — Изображение связи между функциями $\psi(j\omega)$ и $W(j\omega)$.
Рис. 2. — Основная схема регулировки скорости рототролом.
Рис. 3. — Общая схема, соответствующая схеме на рисунке 2.
Рис. 4. — Эквивалентная схема мотор-генератора.
Рис. 5. — Положительная реакция рототрола.
Таблица I. — Круговая диаграмма действительной характеристики частоты для системы замкнутой положительной реакции.
Таблица II. — Круговая диаграмм мнимой характеристики частоты для системы замкнутой положительной реакции.
Таблица III. — Номограмма построения действительной характеристики $P(\omega)$ для системы замкнутой положительной реакции, исходящая из логарифмических характеристик разомкнутой системы.
Таблица IV. — Номограмма построения мнимой характеристики $Q(\omega)$ для системы замкнутой положительной реакции, исходящая из логарифмических характеристик разомкнутой системы.
Таблица V. — Логарифмические характеристики частоты первой цепи.
Таблица VI. — Логарифмические характеристики частоты функции передачи.
Таблица VII. — Логарифмические характеристики частоты снижения скорости, вызванной током нагрузки.
Таблица VIII. — Действительная характеристика частоты.
Таблица IX. — Трапезоидальные характеристики частоты.
Таблица X. — Переходный процесс при внезапном изменении тока нагрузки.

# AUTOMATISATIONS PAR DES MACHINES ÉLECTRIQUES À RÉACTIONS POSITIVES, CALCULÉES PAR LA MÉTHODE DES FRÉQUENCES

(RÉSUMÉ)

Ce travail se rattache à un cycle d'études exposant les méthodes de calcul des commandes électriques automatisées à l'aide de machines amplificatrices, études basées sur l'analyse des systèmes par des fonctions de transfert et sur les caractéristiques de fréquence. L'objet du travail est le traitement graphico-analytique des systèmes automatisés au moyen de machines électriques possédant des réactions positives. On y établit des critériums d'interprétation des réactions positives d'après les nomogrammes de calcul construits pour les réactions négatives, ainsi que des normes de stabilité pour les systèmes considérés. L'analyse d'un schéma classique fait ressortir l'utilité des conclusions auxquelles l'auteur a abouti.

Le même exemple illustre la manière de résoudre certains problèmes particuliers des machines électriques. On traite, notamment, de la considération rigoureuse des chutes de tension dans les machines électriques, au moyen des fonctions de transfert, et de l'établissement de la fonction de transfert de la machine électrique régulatrice à auto-excitation en série (du rototrole). L'auteur établit les fonctions de transfert du circuit générateur-moteur, pour le moteur en charge, le système de réglage comprenant des réactions de tension et de courant. Il montre aussi de quelle manière on peut calculer le processus transitoire au moment de l'intervention brusque d'un courant de charge.

## EXPLICATION DES FIGURES

Fig. 1. — Représentation de la relation entre les fonctions $\psi(j\omega)$ et $W(j\omega)$.
Fig. 2. — Schéma de principe du réglage de la vitesse par rototrole.
Fig. 3. — Schéma-bloc, correspondant au schéma de la figure 2.
Fig. 4. — Schéma équivalent du groupe générateur-moteur.
Fig. 5. — Réaction positive du rototrole.
Planche I. — Diagramme circulaire de la caractéristique réelle de fréquence pour le système fermé par réaction positive.
Planche II. — Diagramme circulaire de la caractéristique imaginaire de fréquence du système fermé par réaction positive.
Planche III. — Nomogramme pour construire la caractéristique réelle $P(\omega)$ du système fermé par réaction positive, en partant des caractéristiques logarithmiques du système ouvert.
Planche IV. — Nomogramme pour construire la caractéristique imaginaire $Q(\omega)$ du système fermé par réaction positive, en partant des caractéristiques du système ouvert.
Planche V. — Caractéristiques logarithmiques de fréquence du premier circuit.
Planche VI. — Caractéristiques logarithmiques de fréquence des fonctions de transfert.
Planche VII. — Caractéristiques logarithmiques de fréquence de la chute de vitesse due au courant de charge.
Planche VIII. — Caractéristique réelle de fréquence.
Planche IX. — Caractéristiques trapézoïdales de fréquence.
Planche X. — Processus transitoire au moment de la variation brusque du courant de charge.

## BIBLIOGRAFIE


1. V. V. Solodovnikov, *Osnovîi avtomaticeskovo regulirovania teoria.* Maşghiz, Moscova, 1954.
2. V. V. Solodovnikov, I. Topceev i G. V. Krutikova, *Ciastotnîi metod postroenia perehodnîh pro'essov s prilojeniem tablit i nomogram.* Moscova, 1955.
3. G. V. Bacikov, *Teoria i metod raceta sistemî ghenerator-dvigatel s electromaşinam reguliatorom.* Electricestvo, 1950, nr. 2.
4. O. V. Slejanovski, *Analiz sistemî upravleniia reversirnîm prokatnîm stanom.* Electricestvo, 1955 nr. 5.
5. A. I. Blajkin, *Automatizarea cu ajutorul mașinilor electrice a dispozitivelor de acționare electrică din mine.* Ed. energetică de stat, București, 1954.
6. D. Damsker, *Calculul sistemelor automate cuprinzînd reacții pozitive prin metoda caracteristicilor logaritmice de frecvență.* Biblioteca IPROMET, București, 1956. Comunicare prezentată la sesiunea științifică I.P.B. din iunie 1956.
7. O. N. Zolotarev, *Elektromaşinnîe regulatori s prodalnîm polem.* Electricestvo, 1953, nr.3.
8. A. A. Voronov, *Elementi teorii avtomaticeskovo regulirovaniia.* Oboronghiz, Moscova 1954, ediția a II-a.
9. M. V. Meerov, *Vvedenie v dinamiku avtomaticeskovo regulirovaniia elektriceskih mașin.* Izdatestvo Akademii Nauk S.S.S.R., Moscova, 1956.
10. V. K. Popov, *Osnovî Elektroprivoda.* Gosenergoizdat, Moscova, 1951.
11. M. G. Cilikin, *Curs general de acționări electrice.* Ed. energetică de stat, București, 1954.
12. I. L. Şapiro, *Elektroprivod tijelîh tokarnăh i karuselnăh stankov i ego dalneişee razvitie.* Elektricestvo, 1955, nr. 5.
13. A. T. Blajkin, *Elektromaşinnoe avtomaticeskoe upravlenie privodami.* Metalurghizdat, Moscova, 1954.
14. M. A. Sonikin, *Elektroprivod s upravleniem v funcții toka dlia vspruogatelnih mehanizmov prokatnih stanov.* Colecția Tnitmaş nr. 500, Maşghiz, Moscova, 1953.
15. H. M. James, N. B. Nichols, R. S. Philips, *Theory of Servomechanisms.* Massachusetts Institute of Technology Radiation, Laboratory Series, New York-Londra, 1947 vol. 25.
16. D. Damsker, *Grupul generator-motor ca element de execuție în acționările automatizate.* Electrotehnica, 1956, nr. 4.
17. Harold Chestnut a. Robert W. Mayer, *Servomechanisms and Regulating System Design.* John Wiley et Sons, New York, 1951 și 1955. vol. I și II.

# ASUPRA METODELOR OBIECTIVE DE DETERMINARE A FENOMENULUI DE DETONAȚIE LA MOTOARELE DE AUTOCAMION DE SERIE *)

DE

ADRIAN CĂLIN VASILESCU

Studiul comportării diferitelor benzine auto în ceea ce privește fenomenul de detonație pe motoare de autovehicul de serie a fost început în cadrul Institutului de energetică atît la bancul de probă, cît și pe diferite trasee, în scopul stabilirii corespondenței dintre cifra octanică a combustibilului și cifra octanică necesară pe cale.

În literatură se precizează mărimile ce caracterizează detonația : începutul detonației, regularitatea și intensitatea ei. Pentru un studiu al comportării la detonație a diferiților combustibili pe motoare de serie, interesează atît începutul detonației, cît și intensitatea ei.

B. D. Z a l o g a [1] precizează dificultatea de a determina obiectiv momentul începutului detonației. În studi le sale se ocupă de un motor monocilindru experimental, la care începutul detonației este caracterizat de apariția primului ciclu cu detonație într-o serie de cicluri normale ce se desfășoară succesiv în motor. Determinarea începutului detonației nu se poate face la motoare de serie cu această metodă, din cauza imposibilității de a pătrunde cu captatorul de impulsuri în apropierea centrului detonației. Din această cauză se propune să se introducă noțiunea de *detonație incipientă*, care precizează o anumită intensitate (arbitrar aleasă) a detonației.

Socotim că valoarea arbitrară a intensității detonației incipiente depinde de tipul motorului și trebuie să reprezinte, într-o anumită scară, o fracțiune standardizată din detonația care are un efect distructiv într-un interval de timp dat. În scopul studiului obiectiv al detonației incipiente, s-au dezvoltat [2], [3], metode care măsoară parametrii funcționali ai motorului și metode care măsoară zgomotul produs de motor.

Obiectul prezentei note este studiul variației unor parametri funcționali ai motorului de serie în domeniul regimului de detonație incipientă.

S-a amenajat un banc experimental pentru motorul de autocamion ZIS-120 (fig. 1) prevăzut cu dispozitive experimentale pentru studiul următoarelor mărimi :

— puterea, măsurată cu frîna hidraulică ;

---

*) Lucrare prezentată Institutului de energetică la data de 13 mai 1956.

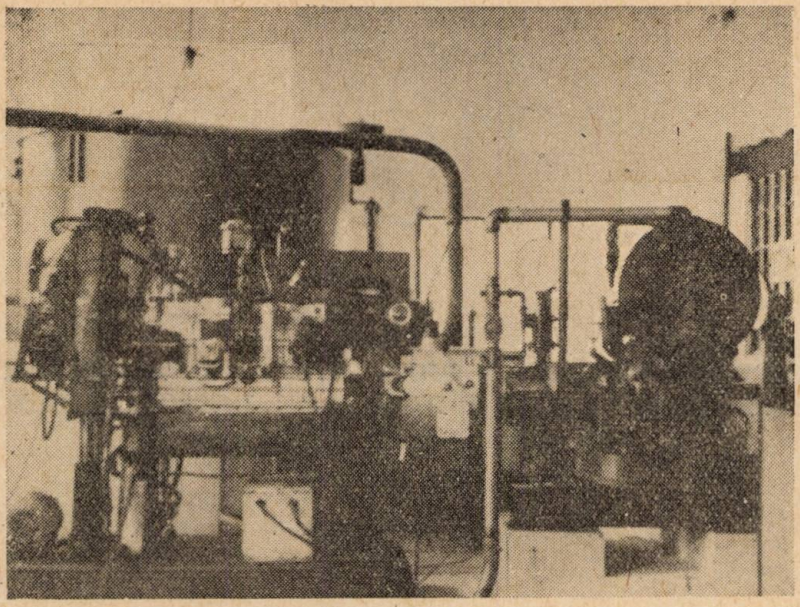


Fig. 1. — Bancul experimental pentru motorul de autocamion ZIS-120.

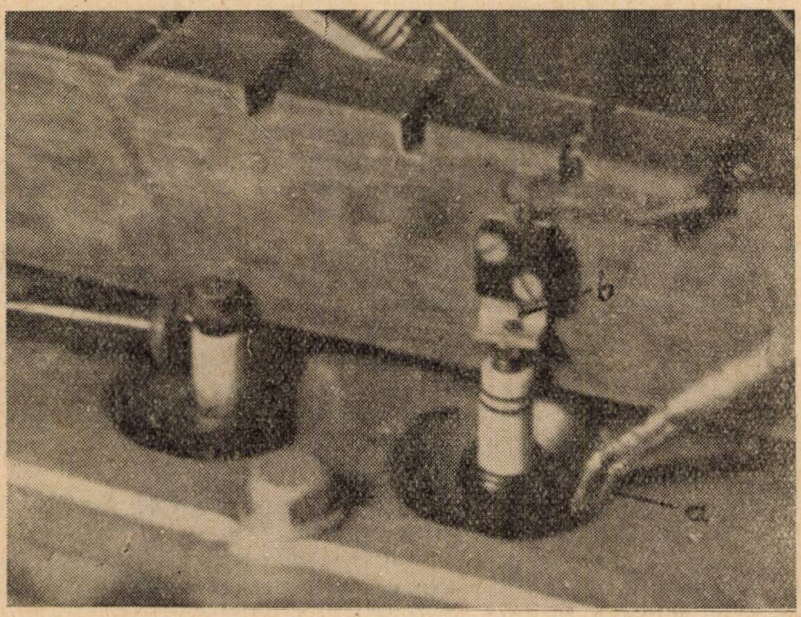


Fig. 2. — Determinarea cu termocuplul a temperaturii sediului bujiei (*a*) și a temperaturii electrodului central al bujiei (*b*).

— turația, măsurată cu tahometrul și contorul de ture;

— avansul la aprindere, măsurat cu un dispozitiv cu bobină suplimentară și eclator pe axul motorului;

— temperatura medie a gazelor arse, măsurată la ieșirea din colectorul de evacuare cu un termocuplu de cromel-alumel în teacă de porțelan;

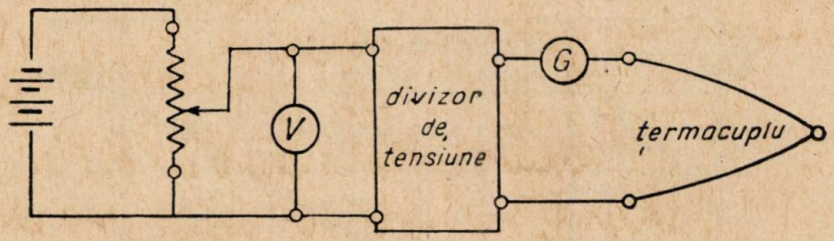



Fig. 3. — Montajul termocuplului pentru determinarea temperaturii apei de răcire.

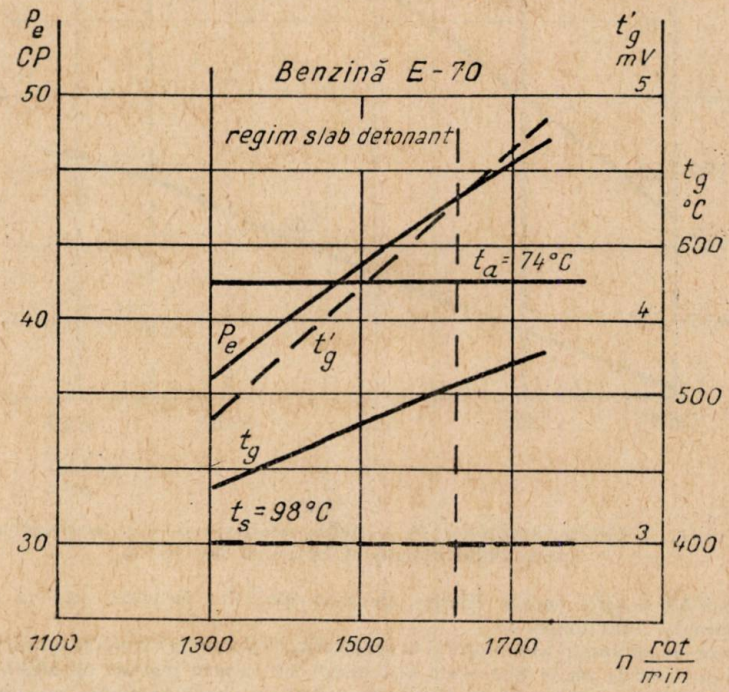



Fig. 4. — Variația cu turația $n$ a mărimilor: $P_e$ — puterea efectivă; $t'_g$ — temperatura gazelor arse măsurată la cilindrul 6; $t_g$ — temperatura medie a gazelor arse; $t_s$ — temperatura sediului bujiei; $t_a$ — temperatura apei de răcire.

— temperatura gazelor arse la ieșirea din cilindrul 6, măsurate cu un termocuplu fin de platin-platin rodiu izolat cu cuarț și teacă subțire de oțel;

— temperatura sediului bujiei (fig. 2) măsurată cu un termocuplu cupru-constantan;

— temperatura electrodului central al bujiei (fig. 2) măsurată cu un termocuplu platin-platin rodiu ;

— temperatura apei de răcire, măsurată cu un termometru cu rezistență ;

— temperatura apei de răcire, în punctul cel mai fierbinte, măsurată cu un termocuplu cupru-constantan, montat în opoziție cu o sursă de curent (fig. 3).

Studiul s-a făcut la plină sarcină, determinîndu-se parametrii indicați mai sus, la diferite turații pînă în regimul detonant auzibil, motorul fiind continuu în regim termic stabil. S-au

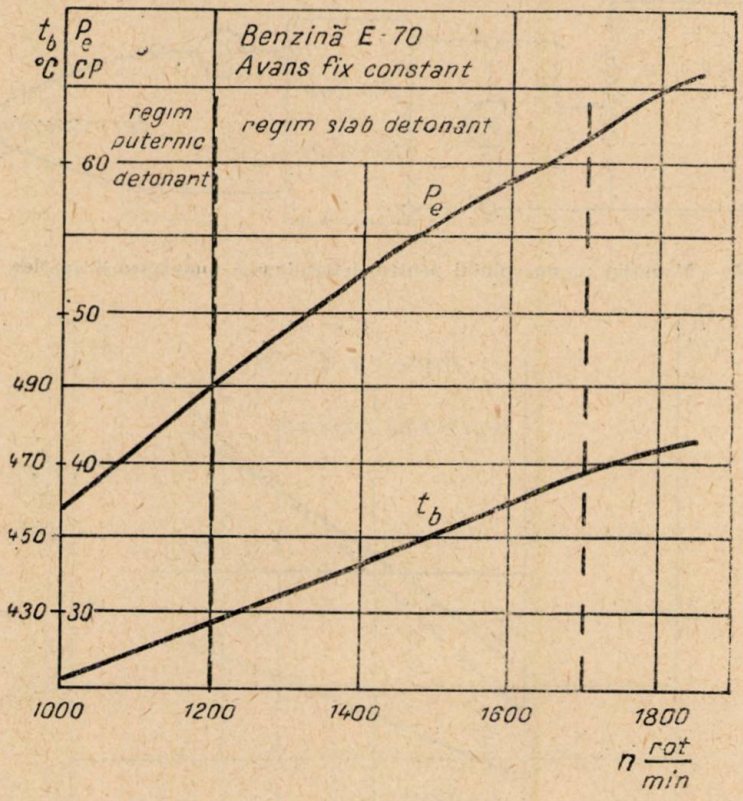



Fig. 5. — Variația mărimilor $P_e$ — putere efectivă și $t_b$ — temperatura electrodului central al bujiei cu turația $n$.

făcut determinări pentru poziții diferite ale avansului fix. Benzina studiată a fost E-70.

Se constată următoarele :

1. O serie de parametri ai motorului în regim (fig. 4) și anume : temperatura sediului bujiei și temperatura apei de răcire (măsurată atît direct, cît și prin metoda opoziției) nu variază atunci cînd se trece la regimul slab detonant. Se explică aceasta prin marea capacitate termică a sistemului de răcire a motorului studiat.

Această constatare nu corespunde observației lui Z a l o g a [1], care nu precizează în articolul său perioada de timp în care s-au făcut determinările.

2. Temperatura gazelor arse scade dacă scade turația ; concomitent cu apariția detonației se micșorează debitul de gaze arse, în timp ce pierderile termice rămîn aceleași, astfel că temperatura gazelor arse nu poate indica apariția detonației incipiente.

3. Temperatura electrodului central al bujiei (fig. 5) scade cu scăderea turației motorului, deși motorul a trecut pînă în regim de detonație puternică. Explicația acestui fenomen stă în

aceea că pierderile termice ale bujiei rămîn constante, în timp ce aportul de căldură în timp scade cu scăderea turației.

Ar putea fi probabilă o variație a temperaturii electrodului central al bujiei la turație și sarcină constantă o dată cu apariția fenomenului de detonație incipientă (spre exemplu prin varierea avansului la aprindere sau a dozajului). Această observație a fost făcută de Zaloga cu un termocuplu montat în camera de ardere. Deoarece fenomenul de detonație nu apare la motorul de autocamion de serie prin sărăcirea dozajului la turație constantă ca în cazul [1], ci prin micșorarea turației la sarcină constantă, s-a studiat acest ultim fenomen, din punctul de vedere al detonației incipiente.

Se trag următoarele concluzii:

1. Parametrii: temperatura apei de răcire, temperatura gazelor arse, temperatura sediului bujiei și temperatura electrodului central al bujiei nu pot indica apariția detonației incipiente pentru motoare de autocamion de serie. Această constatare explică tendințele remarcate în literatură pentru studiul obiectiv al fenomenului de detonație „pe cale" prin studiul zgomotului motorului [4], [5].

2. Este necesar să se îndrepte efortul pentru a se dezvolta o aparatură de studiu a zgomotului motorului, analizîndu-se frecvențele detonației incipiente.

3. Este necesar să se precizeze noțiunile: început de detonație, domeniul detonației acceptabile și limită de detonație.

## BIBLIOGRAFIE

1. B. D. Zaloga, *Proeavlenie i izmerenie detonații v dvigatele iz gorenie v avtotran sportnîh porșnevîh dvigateleah.* Izd. Akad. Nauk SSSR, Moscova, 1951, p. 240.
2. F. Iantsch, *Stand der Klopfmessung in Deutschland.* M.T.Z., 1942, caiet 3, p. 92.
3. G. Johnson, Acta Politehnica, Mec. Eng., 1950, nr. 10.
4. F. Kneule, *Klopfmessungen am Mehrzylinder.* M.T.Z., 1942, caiet 5, p. 187.
5. L. Thaler et R. Guyot, *Contributions à l'étude des valeurs antidétonnantes sur les voitures françaises.* Third World Petroleum Congress, Section VII, p. 206.

# ASUPRA UNEI METODE INDIRECTE DE DETERMINARE A CANTITĂȚII DE COMBUSTIBIL ARSĂ ÎN FOCARUL UNEI INSTALAȚII OARECARE*)

DE

VICTOR V. GHIA

Cantitatea de combustibil arsă în focarul unei anumite instalații poate fi determinată în două moduri: direct și indirect.

Astfel, utilizînd metoda directă, dacă se cunosc condițiile în care are loc arderea combustibilului, se poate aprecia — prin măsurarea cantității de combustibil consumată — care este cantitatea de combustibil arsă.

De multe ori această metodă întîmpină dificultăți în aplicare, din diferite cauze:

— lipsa aparatelor de măsurat consumul de combustibil;

*) Lucrare prezentată Institutului de energetică la data de 27 septembrie 1956.

— necunoașterea pierderilor prin combustibil nears *);

— condiții improprii de montaj a aparatelor de măsură, și altele.

Dacă se cunoaște compoziția combustibilului utilizat și arderea combustibilului are loc în bune condiții, se poate obține indirect prin mai multe metode, cantitatea de combustibil arsă.

În prezenta lucrare se propune o metodă indirectă de lucru, care constă principial în diluarea gazelor de ardere cu o cantitate de aer cunoscută, deci măsurată în prealabil, și din efectuarea analizei gazelor de ardere înainte și după diluare.

Deși metoda ce se va prezenta este aplicabilă în cazul oricărei instalații de ardere a combustibililor, totuși pentru precizarea ideilor ne vom referi la un cuptor.

## 1. Arderea completă

Notațiile principale ce se vor folosi în cursul expunerii sînt următoarele :

$n_e$ = coeficientul de exces de aer la evacuarea din cuptor sau într-un loc înaintea prizei de aer rece folosit la diluarea gazelor de ardere ;

$n_e'$ = coeficientul de exces de aer pentru gazele de ardere diluate cu aer ;

$L_o$ = cantitatea teoretică de aer pentru ardere $\left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3_{\text{comb.}}}\right)$**) ;

$V_{og}$ = cantitatea teoretică de gaze de ardere $\left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3_{\text{comb.}}}\right)$ ;

$V_g$ = cantitatea de gaze rezultată din arderea unității de combustibil la coeficientul de exces de aer $n_e$ $\frac{\text{Nm}^3}{\text{Nm}^3_{\text{comb.}}}$ ;

$V_g'$ = cantitatea de gaze rezultată din arderea unității de combustibil la coeficientul de exces de aer $n_e'$ $\left(\frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3_{\text{comb.}}}\right)$ ;

$D_g$ = cantitatea de gaze evacuate orar din cuptor, la locul de unde au compoziția corespunzătoare coeficientului de exces de aer $n_e$ $\left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}\right)$ ;

$D_a$ = cantitatea de aer rece utilizat la diluarea cantității de gaze de ardere $D_g$ $\left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}\right)$ ;

$B$ = cantitatea de combustibil arsă orar în focar $\left(\frac{\text{Nm}^3_{\text{comb.}}}{\text{h}}\right)$ ;

$\sigma$, $\nu$ = caracteristicile combustibilului folosit ;

$\alpha$ = fracțiunea din conținutul de carbon al unității de combustibil arsă complet ;

$i_{ge}$ = entalpia specifică a gazelor de ardere la temperatura de evacuare din cuptor $\left(\frac{\text{kcal}}{\text{Nm}^3}\right)$ ;

Cantitatea de combustibil ars se poate obține din relația

$$B = \frac{D_g}{V_g} \tag{1}$$

unde $V_g = V_{0g} + (n_e - 1).\ L_o$ (2)

*) Se referă la arderea mecanică incompletă.

**) În cazul că se arde combustibil lichid sau solid, $L_0$, $V_{0g}$, $V_g$, $V_g'$, $B$, se referă la 1 kg combustibil ars.

Făcînd analiza gazelor de ardere — în ipoteza că arderea are loc complet — se poate obține $n_e$ din relația

$$n_e = \frac{0{,}21}{\sigma}\left(\frac{1}{CO_2} + \sigma - 1 - \nu\right).$$

Atunci cînd se cunoaște combustibilului ars, $\sigma$ și $\nu$ se determină imediat, ca de altfel $V_{0g}$ și $L_0$.

Relația (1) nu poate fi folosită ca atare, deoarece nu se cunoaște $D_g$.

Introducînd în gazele de ardere $D_g$, cantitatea cunoscută de aer, $D_a$, rezultă că pentru o unitate de combustibil ars s-a introdus $\frac{D_a}{B}$.

Aerul introdus va conduce la creșterea coeficientului de exces de aer de la valoarea $n_e$ la valoarea $n_e'$, astfel că

$$V_g' = V_{0g} + (n_e' - 1).\, L_0 . \tag{3}$$

Scăzînd relația (2) din relația (3) se obține cantitatea de aer introdusă în gazele de ardere pentru o unitate de combustibil ars

$$(n_e' - n_e) \cdot L_0 = \frac{D_a}{B},$$

sau (4)

$$B = \frac{D_a}{(n_e' - n_e) \cdot L_0}.$$

Relația (4) poate fi folosită la determinarea consumului de combustibil *) dacă se măsoară $D_a$ și se calculează $n_e'$ și $n_e$ pe baza efectuării analizei gazelor de ardere înainte și după diluarea cu aer.

Aplicarea acestei metode este mai ușoară atunci cînd introducerea în gazele de ardere a cantității de aer $D_a$ este o necesitate funcțională a agregatului.

Se pot da cîteva exemple în acest sens.

Astfel, cantitatea de aer $D_a$ poate servi drept agent de răcire pentru gazele evacuate din cuptor înainte ca acestea să treacă prin recuperatorul de căldură.

În acest mod se evită supraîncălzirea elementelor recuperatorului.

Tot ca agent de răcire se poate utiliza aerul introdus $D_a$, în cazul cuptoarelor de uscat prevăzute cu focar independent, sau se poate utiliza drept gaz ejector în cazul cuptoarelor la care tirajul se efectuează indirect cu ajutorul unui ejector.

Situații similare se pot ivi și în cazul altor instalații de ardere a combustibililor.

Cunoscînd cantitatea de combustibil arsă orar $B$ și admițînd că $n_e$ este valoarea coeficientului de exces de aer la evacuarea din cuptor, cantitatea de gaze evacuate orar este

$$D_g = B.\, V_g ,$$

sau ținînd seama de relațiile (2) și (4)

$$D_g = \frac{D_a\,[V_{0g} + (n_e - 1) \cdot L_0]}{(n' - n) \cdot L_0}. \tag{5}$$

*) În cazul arderii complete cantitatea de combustibil arsă în focar este egală cu consumul de combustibil.

Căldura fizică *) evacuată o dată cu gazele de ardere este

$$Q_{fiz} = D_{ge} \cdot i_{ge}$$

### 2. Arderea incompletă

Arderea combustibilului incomplet poate avea loc din motive chimice şi mecanice.

După cum se ştie arderea chimică incompletă poate apărea practic în următoarele cazuri:

— aerul din focar este insuficient sau, chiar dacă este în cantitate corespunzătoare, se amestecă imperfect cu elementele de ardere din combustibil;

— temperatura din focar este prea mică sau volumul focarului este insuficient dimensionat

— apare fen menul de disociaţie.

Produsele arderii incomplete din motive chimice sînt de obicei: CO, $H_2$, $CH_4$, $C_mH_n$ şi carbonul nears. În cazul cînd în gazele evacuate apar numai gazele CO, $H_2$ şi $CH_4$, coeficientul de exces de aer $n_e$ se află din relaţia

$$n_e = \frac{0{,}21}{\sigma}\left(\alpha\,\frac{1 - 0{,}5\,CO - 1{,}5\,H_2 - 2\,CH_4}{CO_2 + CO + CH_4} + \sigma - 1 - \nu\right). \qquad (6)$$

De asemenea, cantitatea de gaze rezultate din arderea unităţii de combustibil $V_g$ se va modifica în mod corespunzător iar consumul de combustibil rezultă din relaţia (4).

Pierderile datorite arderii mecanice incomplete pot apărea curent prin:

— căderea masei combustibile prin interstiţiile barelor de grătar sau antrenarea combustibilului spre coş o dată cu gazele de ardere evacuate;

— zgură.

În această situatie determinarea consumului de combustibil este mai dificilă. Dacă se cunosc pierderile de combustibil nears $\Delta B$ consumul de combustibil rezultă din relaţia

$$B' = B + \Delta B. \qquad (7)$$

Pentru ca rezultatele obţinute să fie juste, este necesar ca — atît în cazul arderii complete, cît şi în cazul arderii incomplete — variaţia coeficientului de exces de aer de la valoarea $n_e$ la valoarea $n_e'$, să fie produsă numai de cantitatea de aer $D_a$.

Astfel, va trebui să nu se aspire aer fals pe porţiunea de canal de evacuare între prizele de preluat probele de gaze de ardere.

## CONCLUZII

În lucrarea prezentă se dă o metodă indirectă de evaluare a consumului de combustibil.

Dacă se diluează gazele evacuate din instalaţia respectivă de ardere a combustibilului, iar apoi se efectuează analiza gazelor de ardere, înainte şi după diluare, folosind relaţia (4), se obţine cantitatea de combustibil arsă în focar. În cazul că arderea are loc în bune condiţii, diferenţa dintre consumul de combustibil şi cantitatea de combustibil arsă este neglijabilă, astfel că metoda preconizată se poate aplica cu succes.

*) Prin căldură fizică se înţelege entalpia sensibilă a substanţei considerate.

# ASUPRA UNOR REZULTATE OBȚINUTE LA ÎNCĂLZIREA GAZULUI METAN *)

DE

ONOFREI UNGUREANU

Transportul gazului metan pe conducte lungi necesită o presiune de plecare destul de ridicată. Din cauza temperaturii scăzute, a solului, această presiune creează condiții favorabile de formare a hidraților de metan, care obturînd conducte, provoacă deranjamente grave de exploatare.

Pentru prevenirea formării hidraților a fost necesar să se monteze la începutul unei conducte o instalație de încălzire cu apă caldă.

Datele de calcul au fost următoarele :

| | |
|---|---|
| — presiunea gazului | 46 kgf/cm² |
| — temperatura gazului la intrare | 6°C |
| — temperatura gazului la ieșire | 20°C |
| — debit de gaz metan foarte mare. | |

S-a ales ca tip. un schimbător de căldură în care apa caldă să circule prin țevi înguste, iar gazul să circule prin exteriorul lor, în contra curent încrucișat. Din cauza presiunii mari, care

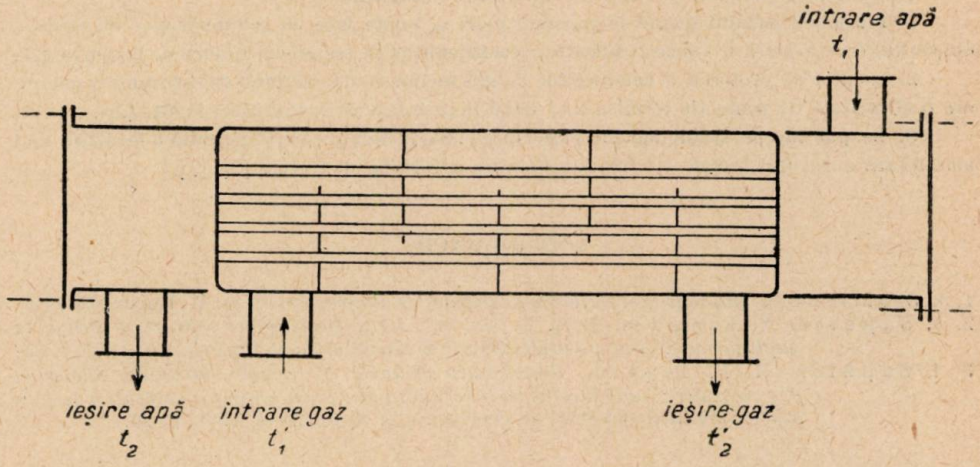



Fig. 1. — Schema schimbătorului de căldură apă caldă-gaz metan.

conduce la pereți foarte groși și a debitului mare ce trebuie încălzit, s-au proiectat 4 schimbătoare în paralel, lucru care a permis rezolvare a problemei, cu diametre și grosimi de perete obișnuite (fig. 1).

Prin calcul s-a determinat coeficientul de trecere a căldurii $K_1 = 120$ kcal/m² h grd [1].

Presiunea de probă în manta a fost de 75 kgf/cm².

*) Lucrare prezentată Institutului de energetică la data de 8 iulie 1956.

După montarea și punerea în funcțiune s-au efectuat o serie de măsurători, dintre care sînt redate mai jos cele executate în ziua de 10 martie, 1956, și anume :

| | |
|---|---|
| — presiunea gazului metan la intrare | 45,1 kgf/cm² |
| — presiunea gazului metan la ieșire | 45,0 kgf/cm² |
| — temperatura gazului metan la intrare | 5,3°C |
| — temperatura gazului metan la ieșire | 21,2°C |
| — temperatura apei la intrare | 33,5°C |
| — temperatura apei la ieșire | 20°C |

Recalculîndu-se cu datele de mai sus verificate cu date ale altor măsurători analoge, valoarea coeficientului de trecere al căldurii, se găsește cifra $K_1 = 240$ kcal/m² h grd, ceea ce arată că atît execuția cît și montajul s-au realizat în condiții bune, iar coeficienții parțiali indicați în literatura de specialitate au valori acoperitoare.

Tot cu această ocazie s-a măsurat temperatura solului la adîncimea de îngropare a conductei, obținîndu-se o valoare medie de 2°,5 la adîncime de 1,2 m.

Recalculîndu-se cu valorile de mai sus coeficientul de trecere al căldurii de la gaz prin peretele conductei la sol, care în proiect a fost luat la valoarea $K_2 = 1{,}30$ kcal/m² h grd, s-a obținut valoarea $K_2 = 1{,}58$ kcal/m² h grd. Se precizează că gazul este transportat printr-o conductă cu peretele gros de 9,75 mm, avînd în exterior o izolație de bitumen în grosime de circa 6 mm, cu un înveliș de hîrtie.

Terenul în care este îngropată conducta este argilos, iar la data măsurătorii nu era acoperit cu zăpadă.

Din datele de mai sus se desprind următoarele concluzii :

1. Încălzirea gazului metan la presiuni mari se poate face cu schimbătoare de căldură obișnuite, care asigură o valoare ridicată a coeficientului de trecere a căldurii de la apă la gaz.

2. Izolația de protecție a conductelor de gaz metan contra acțiunii de coroziune a solului are o eficacitate de protecție termică mai slabă decît înfășurările executate în alte țări.

3. Se pot începe studii pentru proiectarea unei instalații care să permită o încălzire mai accentuată a gazului metan așa cum ar necesita-o turbina de trecere [2], [3].

## BIBLIOGRAFIE

1. A. S. Smirnov, *Instalațiile și exploatarea stațiilor de compresoare.* I. D. T., București, 1951.
2. I. Saphier, V. Pimsner și A. C. Vasilescu, *Posibilitatea obținerii de energie la exploatările de gaze naturale.* Studii și cercetări de energetică, t.II,1952, p. 89.
3. I. Saphier și P. Ioanid, *Posibilitatea obținerii de energie mecanică, căldură și frig cu ajutorul unei turbine de trecere prin utilizarea presiunii naturale a gazului metan.* Studii și cercetări de energetică, t. V, nr. 3—4, 1955, p. 20.

B. P. TEBENKOV, *Rekuperatori dlia promîşlennîh pecei* (Recuperatoare pentru cuptoare industriale). I.D.T., Bucureşti, 1956, 299 pag.

Lucrarea este întocmită pentru uzul institutelor de proiectare şi al personalului tehnico-ingineresc din întreprinderi care se ocupă cu calculul, construcţia şi exploatarea recuperatoarelor; ea poate fi folosită şi de studenţii institutelor metalurgice şi energetice de învăţămînt superior.

În ansamblu, lucrarea cuprinde noţiunile principale cu privire la construcţia, calculul, montajul şi exploatarea recuperatoarelor pentru cuptoarele de încălzire şi tratamente termice din industria metalurgică şi a construcţiei de maşini. Pe baza rezultatelor din cercetările făcute, sînt prezentate date privind caracteristicile termice şi aerodinamice ale recuperatoarelor, precum şi exemple de calcul.

De asemenea, în lucrare sînt introduşi indicii industriali ai funcţionării recuperatoarelor şi se arată metodele cele mai eficace de îmbunătăţire a lor.

Cartea este împărţită în cinci părţi:

Partea întîi, intitulată *Principiile generale asupra preîncălzirii cu ajutorul recuperatoarelor*, extinsă pe 53 pagini, cuprinde cinci capitole din care trebuie remarcat capitolul II, care tratează despre influenţa preîncălzirii aerului asupra funcţionării cuptoarelor.

La acest capitol trebuie făcută observaţia că formula (2) — pe baza căreia s-au construit numeroase monograme de calcul al economiei de combustibil $z$ — nu dă rezultate suficient de juste în toate situaţiile practice.

În cazul cuptoarelor la care arderea normală a combustibilului poate asigura în focar temperatura necesară desfăşurării procesului tehnologic în bune condiţii, preîncălzirea aerului necesar arderii—şi a combustibilului atunci cînd este cazul—nu conduce la economia de combustibil $z$ indicată de monograme.

Dacă nu se modifică coeficientul de exces de aer la care are loc arderea normală, preîncălzirea aerului de ardere va avea ca prim efect ridicarea temperaturii în focar. Pentru a nu periclita buna desfăşurare a procesului tehnologic, tendinţa de creştere a temperaturii din focar va fi anihilată prin mărirea excesului de aer la care are loc arderea.

Creşterea coeficientului de exces de aer, măreşte pierderile de căldură prin gazele de ardere evacuate din cuptor, astfel că din acest motiv randamentul termic al cuptorului va scădea. Un efect contrar va avea însă căldura adusă în focar o dată cu aerul preîncălzit.

Rezultatul suprapunerii acestor două efecte contrarii este favorabil, obţinîndu-se o anumită economie de combustibil faţă de arderea normală, care este mai mică decît cea indicată de formula (2). Pentru acest motiv calculul economiei de combustibil — pentru valorile mijlocii şi mari ale temperaturii de preîncălzire a aerului pentru ardere sau a gazelor combustibile — va trebui să se efectueze corespunzător, deoarece astfel rezultatul ce se obţine prezintă o eroare apreciabilă.

Partea a doua, intitulată *Recuperatoare metalice*, fiind extinsă pe 181 pagini, se ocupă de recuperatoarele din fontă cu proeminențe acirculare, recuperatoarele de fontă și oțel blocuri termice, recuperatoarele din tuburi netede de oțel, recuperatoarele prin radiație și alte tipuri.

Cea mai mare atenție se acordă recuperatoarelor din fontă cu proeminențe acirculare, care sînt tratate pe 70 de pagini.

Deosebit de interesante sînt datele comparative și recomandările pentru alegerea tipului de recuperator metalic adaptabil la un anumit tip de cuptor.

Partea a treia, intitulată *Recuperatoare ceramice*, extinsă pe 25 de pagini, tratează dezvoltat capitolul al doilea unde se arată construcția, exploatarea, montajul și calculul recuperatoarelor ceramice.

Partea a patra, extinsă pe 8 pagini, se ocupă de izolația termică a recuperatoarelor, iar partea a cincea, extinsă pe 7 pagini, prezintă tendințele noi cu privire la sporirea eficienței recuperatoarelor.

La sfîrșitul cărții este dată o bibliografie bogată, care ușurează înțelegerea și adîncirea diferitelor probleme tratate.

De asemenea ca anexe se dau :

— tabele cu proprietățile fizice ale gazelor și ale materialelor întrebuințate la construcția elementelor de recuperator ;

— valorile coeficientului de pierdere de presiune locală $\xi$ în diferite cazuri ;

— două nomograme necesare la calculul coeficientului de cedare a căldurii $\alpha$ pentru fasciculele de țevi ;

— și două nomograme pentru calculul pierderilor de presiune introduse de fasciculele de țevi.

Datorită faptului că se dau la începutul lucrării toate notațiile ce se vor folosi pe parcurs, se aduce o ușurință în parcurgerea și înțelegerea materialului tratat.

Traducerea efectuată de I.D.T. prezintă în unele locuri expresii necorespunzătoare, ca de exemplu „Principiile generale de preîncălzire prin recuperatoare".

În concluzie lucrarea recenzată prezintă interes deosebit pentru problemele prezentate și pentru că suplinește un gol în literatura noastră tehnică de specialitate.

*Victor V. Ghia*

# DIN ACTIVITATEA INSTITUTULUI DE ENERGETICĂ AL ACADEMIEI R. P. R.

## CONSFĂTUIREA „UTILIZAREA ENERGETICĂ A GAZELOR NATURALE ÎNAINTEA CHIMIZĂRII SAU COMBUSTIEI LOR"

În zilele de 3 şi 4 octombrie 1956 a avut loc în sala MEEIE consfătuirea organizată de Institutul de energetică al Academiei R.P.R. cu subiectul *Utilizarea energetică a gazelor naturale înaintea chimizării sau combustiei lor*. Consfătuirea a fost urmată de o vizită la staţia experimentală a Institutului de energetică al Academiei R.P.R., de la cîmpul de gaz metan de la Saroş, în zilele de 5 şi 6 octombrie 1956.

Lucrările consfătuirii au fost deschise în dimineaţa zilei de 3 octombrie de academician I. S. Gheorghiu, preşedintele secţiei a III-a.

În cuvîntarea prof. Remus Răduleţ, membru corespondent al Academiei R.P.R., directorul Institutului de energetică, s-a scos în evidenţă aportul Institutului de energetică în rezolvarea acestei probleme, astăzi cercetată multiplu şi în străinătate.

Prof. C. Dinculescu, membru corespondent al Academiei R.P.R., a dezvoltat referatul privitor la *Politica generală de utilizare a gazelor naturale.*

În continuare s-au dezvoltat referatele din partea Institutului de energetică *Utilizarea energetică a presiunii naturale a gazului metan*, prezentat de ing. V. Pimsner ; *Compresorul cu jet de gaze naturale*, prezentat de ing. C. A. Vasilescu şi *Utilizarea turbinei de trecere şi a turbionatorului frigorific în exploatarea şi transportul gazului metan*, prezentat de ing. P. Ioanid.

Referatele au cuprins şi rezultatele experimentale obţinute de cercetătorii Institutului de energetică.

Trustul pentru Exploatarea Gazului-Mediaş a prezentat două referate : *Influenţa introducerii compresorului cu jet şi a turbinei de trecere asupra politicii de exploatare a gazelor naturale* de ing. Pericles Svoronos şi *Posibilităţi de mărire a productivităţii muncii în exploatarea gazelor naturale, prin automatizarea şi folosirea compresoarelor cu jet şi a turbinei de trecere*, de ing. Onofrei Ungureanu.

Referatele au arătat modul de aplicare a turbinei de trecere şi compresorului cu jet în exploatarea şi transportul gazului metan.

După prezentarea aspectelor legate de exploatarea şi transportul gazului metan, ing. S. Faur, din partea Institutului de energetică, a dezvoltat referatul *Aplicarea principiilor de utili-*

*zare a energiei gazelor naturale înainte de chimizare sau arderea lor, prin folosirea turbinei de trecere și a compresorului cu jet de gaze naturale în industria chimică.*

Ing. Petcu de la LCSS-Cîmpina a dat citire unei note cu privire la *Utilizarea compresorului cu jet la recuperarea gazelor din țițeiul separat prin presiuni superioare presiunii atmosferice.*

Cuvîntările din partea ministerelor interesate în această problemă (ing. Metsch din partea MIP, ing., Dăscălescu din partea MICH,, ing. Rădulescu din partea MGCIL, ing.. Dinulescu din partea MEEIE) au arătat posibilitățile de aplicare imediată a principiilor expuse. Concluziile consfătuirii au fost prezentate de prof. C. D i n c u l e s c u.

La consfătuire au participat mulți ingineri și specialiști de la ministerele și industriile interesate. La sfîrșitul fiecărei ședințe s-au purtat discuții ample, care au scos în evidență necesitatea utilizării energetice a gazelor naturale și posibilitățile imediate de aplicare a mașinilor și aparatelor prezentate ; compresorul cu jet, turbina de trecere și turbionatorul frigorific.

În zilele de 5 și 6 octombrie, o parte din delegați s-au deplasat la cîmpul de gaze naturale de la Saroș, pentru a vizita stația experimentală a Institutului de energetică al Academiei R.P.R. S-au făcut demonstrații cu turbina de trecere și turbionatorul frigorific instalat în hala stației experimentale.

*C. A. Vasilescu*

ACADEMIA REPUBLICII POPULARE ROMÎNE
INSTITUTUL DE ENERGETICĂ

# STUDII ŞI CERCETĂRI DE ENERGETICĂ

Tomul VI 1956

## INDEX ALFABETIC


| | nr. | pag. |
|---|---|---|
| APETREI C. şi FAUR S., Sarcini de cercetare actuale în domeniul energeticii | 3 | 183 |
| *ENERGETICĂ GENERALĂ* | | |
| NITU V., Exprimarea matematică a siguranţei în exploatare a schemelor electrice | 3 | 189 |
| PODANI MIRCEA, Metodologia întocmirii cadastrului hidroenergetic pe teritoriul R.P.R. | 1—2 | 7 |
| *TERMOENERGETICĂ ŞI TERMOTEHNICĂ* | | |
| GHIA V. VICTOR, Contribuţii la evaluarea economiei de combustibil rezultată din aplicarea la cuptoare a arderii cu recirculaţie combinată cu preîncălzirea aerului de ardere | 1—2 | 23 |
| PĂNOIU N., Asupra consumului de combustibil la cuptoarele de clinker fabricate de uzinele „23 August" la funcţionarea cu gaz metan | 4 | 403 |
| PIMSNER VICTOR şi VASILESCU ADRIAN CĂLIN, Influenţa unor parametri funcţionali şi constructivi asupra compresorului cu jet de gaze naturale | 3 | 207 |
| STAICU C. I., Analiza dimensională. Asupra convecţiei staţionare în circulaţia forţată turbulentă a aerului | 4 | 391 |
| VASILESCU A. C., PIMSNER V. şi SVORONOS P., Contribuţie la dezvoltarea teoriei politicii de exploatare a gazelor naturale folosind compresorul cu jet de gaze naturale | 3 | 219 |
| *MAŞINI TERMICE* | | |
| VASILESCU ADRIAN CĂLIN şi PIMSNER VICTOR, Contribuţie la studiul motoarelor cu ardere internă prin intermediul cifrelor caracteristice | 1—2 | 41 |
| VASILESCU A. C. şi PIMSNER V., Influenţa dozajelor sărace asupra caracteristicii de putere a motoarelor cu aprindere prin scînteie şi combustibil lichid, transformate să funcţioneze cu gaze naturale | 3 | 243 |
| *COMBUSTIBILI SOLIZI* | | |
| BLUM I. şi colaboratori, Studiul chimic şi tehnologic al turbelor din R.P.R. Nota I. Studiul caracteristicilor chimico-tehnice şi al gradului de turbificare | 1—2 | 67 |
| BLUM I., ROSENBERG M. şi TACU V., Valorificarea $SO_2$ din gazele de ardere ale lignitilor în centralele termoelectrice | 1—2 | 81 |
| BLUM I. şi colaboratori, Studiul chimic şi tehnologic al turbelor din R.P.R. Nota II. Prelucrări mecanice şi procese chimico-tehnologice aplicate turbelor din R.P.R. | 3 | 265 |

| | nr. | pag. |
|---|---|---|
| BLUM I. L., Elemente caracteristice în procesul de cocsificare a cărbunelui. Nota I. Asupra bitumenului din cărbunii cocsificabil | 4 | 425 |
| *ELECTROENERGETICĂ ŞI ELECROTEHNICĂ* | | |
| ANDRONESCU PLAUŢIUS, Sistemul de măsuri ca parte integrantă din sistemul de mărimi | 3 | 281 |
| APETREI C. şi ELEFTERESCU M., Metodele electrodinamice ale sistemelor electroenergetice. Modelarea generatoarelor sincrone | 3 | 311 |
| BUDEANU C., Asupra funcţionării supapelor electronice | 1—2 | 115 |
| DAMSKER DOREL, Automatizări cu maşini electrice cuprinzînd reacţii pozitive calculate prin metoda frecvenţelor | 4 | 537 |
| DIMO P., Aplicarea metodei consumatorului unic în cercetarea stabilităţii dinamice a sistemelor energetice (cu ajutorul graficelor de scurtcircuit) | 4 | 505 |
| FRANSUA AL., Cîteva precizări în legătură cu aplicarea de către G. Kron a calculului matricial în studiul reţelelor electrice complexe | 4 | 461 |
| MANEA F., Condiţii limită de stabilitate statică a sistemelor electroenergetice | 3 | 329 |
| MARINESCU M. şi POPOV M., Asupra formelor optime ale forţei electromotoare şi inductanţei în maşinile cu inductanţa variabilă | 1—2 | 125 |
| MOCANU C. I., O teoremă în studiul reţelelor electrice prin calcul matricial | 4 | 473 |
| NEDELCU V. N., Determinarea expresiilor curenţilor care apar în înfăşurările statorului generatorului în momentul conectării acestuia la reţea prin metoda autosincronizării | 1—2 | 141 |
| VASILESCU KARPEN N., Rolul electronilor în transmisia energiei electrice. Critica actualei teorii | 1—2 | 97 |
| *MOTOARE CU COMBUSTIE INTERNĂ* | | |
| GAIGINSCHI E., Domeniul de reversibilitate a masinilor termice. Aplicaţiile acestei noţiuni la studiul motoarelor cu ardere internă | 4 | 441 |
| *NOTE* | | |
| BUIMOVICI D., Asupra experienţelor de ardere a lignitilor din R.P.R. în R.D. Germană | 1—2 | 151 |
| CSABA NAGY, Consfătuirea organizată de Consiliul central A.S.I.T. şi Institutul de energetică al Academiei R.P.R. în problema consumului specific de energie | 1—2 | 153 |
| MICLESCU T. şi MANEA S., Kilonumărul unitate de raportare a consumului de energie electrică în filaturile de bumbac | 3 | 347 |
| VASILESCU C. A. şi PIMSNER V., Experimentări realizate cu un compresor cu jet de gaze naturale | 3 | 358 |
| GHIA V. VICTOR, Asupra unei metode indirecte de determinare a cantităţii de combustibil arsă în focarul unei instalaţii oarecare | 4 | 563 |
| VASILESCU ADRIAN CĂLIN, Asupra metodelor obiective de determinare a fenomenului de detonaţie la motoarele de autocamion de serie | 4 | 559 |
| UNGUREANU ONOFREI, Asupra unor rezultate obţinute la încălzirea gazului metan | 4 | 567 |
| *AUTOREFERATE* | | |
| BĂLĂ C., Reactanta inversă a maşinii sincrone trifazate | 3 | 370 |
| FRANSUA ALEXANDRU, Studiul unei maşini electrice de curent continuu, cu caracteristica serie, fără înfăşurare de excitaţie folosind fluxul de reacţie al indusului | 3 | 363 |
| *RECENZII* | | |
| BĂRĂNESCU GEORGE, Calculul proceselor de ardere, de Adrian Călin Vasilescu şi Victor Pimsner | 1—2 | 156 |

| | nr. | pag. |
|---|---|---|
| BULGAKOV A. A., *Ciastotnoe upravlenie asinkronnîh elektrodvigatelei* (Reglajul vitezei la motoarele asincrone prin variația frecvenței sursei de alimentare), de V. N. Nedelcu | 1—2 | 158 |
| FILOMENKO G. K. și LEBEDEV P. D., Instalații de uscare, de Victor Ghia | 3 | 382 |
| POPESCU PASCAL, PIMSNER VICTOR și VASILESCU A. C., Contribuție la studiul și fabricația combustibililor pentru turbomotoare de avion, de Marcel Biener | 3 | 384 |
| MOSTKOV M. A., *V vedenie v sistemnuiu hidroenergetiku* (Introducere în hidroenergetica sistemelor energetice), de Podani Mircea | 1—2 | 155 |
| SCHOLL OBERING W., *Anhaltszahlen über den Elektrizitäts-Kraft- und Wärmebedarf der Industrie* (Indici de consum de energie electrică, forță și căldură în industrie), de M. Biener | 3 | 381 |
| TEBENKOV B. P., *Recuperatoare pentru cuptoare industriale*, de Victor V. Ghia | 4 | 569 |
| WEILL JACKY, *Progrès récents dans le contrôle des réacteurs* (Progrese recente în reglarea reactorilor), de M. V. Popov | 1—2 | 159 |
| I.D.T., Metode noi de apreciere și valorificare a turbelor, de Gheorghiță C. Ionescu | 3 | 384 |
| *DIN ACTIVITATEA INSTITUTULUI DE ENERGETICĂ AL ACADEMIEI R.P.R.* | 1—2 | 161 |
| *DIN ACTIVITATEA INSTITUTULUI DE ENERGETICĂ AL ACADEMIEI R.P.R.* | 4 | 571 |

АКАДЕМИЯ РУМЫНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ

ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ

# ТРУДЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ЭНЕРГЕТИКЕ

Том VI 1956

## АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ


| | № | Стр |
|---|---|---|
| АПЕТРЕЙ К. и ФАУР С., Насущные исследовательские задачи в области энергетики | 3 | 183 |
| *ОБЩАЯ ЭНЕРГЕТИКА* | | |
| НИТУ В., Математическое выражение надежности эксплоатации электрических систем | 3 | 189 |
| ПОДАНИ М., Методология составления гидроэнергетического кадастра на территории РНР | 1—2 | 7 |
| *ТЕРМОЭНЕРГЕТИКА* | | |
| ВАСИЛЕСКУ А. К., ПИМСНЕР В. и СВОРОНОС П., К вопросу о разработке природных газов путем использования газоструйного компрессора | 3 | 219 |
| ГИА В. В., К оценке экономии топлива в результате применения в печах циркуляционного горения с воздухоподогревом | 1—2 | 23 |
| ПИМСНЕР В. и ВАСИЛЕСКУ А. К., Влияние некоторых функциональных и конструктивных параметров на газоструйный компрессор, работающий на природных газах | 3 | 207 |
| ПЭНОЮ Н., О расходе горючего в работающих на болотном газе клинкерных печах, построенных заводом „23 Августа“ | 4 | 403 |
| СТАЙКУ К. И., Размерный анализ. О стационарной конвекции в принудительной турбулентной циркуляции воздуха | 4 | 391 |
| *ТЕРМИЧЕСКИЕ МАШИНЫ* | | |
| ВАСИЛЕСКУ А. К. и ПИМСНЕР В., К исследованию двигателей внутреннего сгорания при помощи соответствующих характерных цифр | 1—2 | 41 |
| ВАСИЛЕСКУ А. К. и ПИМСНЕР В., Влияние тощих дозировок на характеристику мощности двигателей с зажиганием искрой, работающих на жидком топливе, при переключении на природные газы | 3 | 243 |
| *ТВЕРДОЕ ТОПЛИВО* | | |
| БЛУМ И. и соавторы, Химико-технологическое исследование торфов РНР. Сообщение I. Исследование техно-химических характеристик и степени торфообразования | 1—2 | 67 |

| | № | Стр. |
|---|---|---|
| БЛЮМ И., РОЗЕНБЕРГ М. и ТАКУ В., Использование $SO_2$, содержащегося в дымовых газах от сжигания лигнитов в теплоэлектроцентралях | 1—2 | 81 |
| БЛЮМ И. и соавторы, Химико-технологическое исследование торфов РНР. Сообщение II. Механическая обработка и использование химико-технологических процессов на торфе РНР | 3 | 265 |
| БЛЮМ И., Характерные элементы процесса коксования угля. Сообщение I. О битуме, получаемом из коксуемого угля | 4 | 425 |
| *ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА* | | |
| АНДРОНЕСКУ П., Система мер как составная часть системы величин | 3 | 281 |
| АПЕТРЕЙ К. и ЭЛЕФТЕРЕСКУ М., Электродинамические модели электроэнергетических систем. Моделирование синхронных генераторов | 3 | 311 |
| БУДЯНУ К., О работе электронных клапанов | 1—2 | 115 |
| ВАСИЛЕСКУ-КАРПЕН Н., Роль электронов в передаче электроэнергии. Критика существующей теории | 1—2 | 97 |
| ДАМСКЕР Д., Автоматизации электрическими машинами при наличии положительных реакций, вычисленные по методу частот | 4 | 537 |
| ДИМО П., Применение метода единого потребления к исследованию динамической устойчивости энергетических систем (при помощи графиков короткого замыкания) | 4 | 505 |
| МАНЯ Ф., Предельные условия статической устойчивости электроэнергетических систем | 3 | 329 |
| МАРИНЕСКУ М. и ПОПОВ М., Об оптимальных формах электродвижущей силы и индуктивности в машинах с переменной индуктивностью | 1—2 | 125 |
| МОКАНУ К. И., Новая теорема, вытекающая из исследования электрических сетей при помощи матричного исчисления | 4 | 473 |
| НЕДЕЛКУ В. Н., Выражения токов, возникающих в обмотках статора синхронного генератора в момент включения его в сеть способом самосинхронизации | 1—2 | 141 |
| ФРАНСУА А., Несколько уточнений в связи с применением Г. Кроном матричного расчета для исследования комплексных электрических сетей | 4 | 461 |
| *ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ* | | |
| ГАИЧИНСКИЙ Э., Область обратимости тепловых двигателей. Применение этого понятия для изучения двигателей внутреннего сгорания | 4 | 441 |
| *ЗАМЕТКИ* | | |
| БУЙМОВИЧ Д., Опыты использования лигнитов Румынской Народной Республики в Германской Демократической Республике | 1—2 | 151 |
| ВАСИЛЕСКУ А. К. и ПИМСНЕР В., Опыты, проведенные над газоструйным компрессором, работающим на природных газах | 3 | 358 |
| ВАСИЛЕСКУ А. К., Об объективных методах определения явления детонации в серийных двигателях автогрузовиков | 4 | 559 |
| ГИА В., Косвенный метод определения количества топлива, сожженного в топке любой установки | 4 | 563 |
| МИКЛЕСКУ Т. и МАНЯ С., Километр как единица учета потребления электрической энергии в бумагопрядильнях | 3 | 347 |
| НОГИ ЧАБА, Совещание, созванное Центральным советом Научного общества инженеров и техников и Институтом энергетики Академии РНР по вопросу удельного потребления энергии | 1—2 | 153 |
| УНГУРЯНУ О., О некоторых результатах, полученных при сгревании природного газа | 4 | 567 |

| | № | Стр |
|---|---|---|
| *АВТОРЕФЕРАТЫ* | | |
| БЫЛА К., Обратный реактанс трехфазной синхронной машины | 3 | 370 |
| ФРАНСУА А., Исследование при помощи потока реакции якоря электрической машины постоянного тока с серийной характеристикой без обмотки возбуждения | 3 | 363 |
| *РЕЦЕНЗИИ* | | |
| БУЛГАКОВ А. А., Частотное управление асинхронных электродвигателей, *В. Н. Неделку* | 1—2 | 158 |
| БЭРЭНЕСКУ Д., Расчет процессов горения, *Адриан Кэлин, Василеску* и *Виктор Пимснер* | 1—2 | 156 |
| И. Д. Т., Новые методы оценки и освоения торфов, *Г. К. Ионеску* | 3 | 384 |
| ОСТКОВ М. А., Введение в системную гидроэнергетику | 1—2 | 155 |
| ПОПЕСКУ П., ПИМСНЕР В. и ВАСИЛЕСКУ А. К., К вопросу об исследовании и фабрикации горючего для турбодвигателей самолетов, *М. Бинер* | 3 | 384 |
| ТЕБЕНКОВ Б. П., Рекуператоры для промышленных печей, *В. Гиа* | 4 | 569 |
| УЭЛЛ ЖАК, Progrès récents dans le contrôle des réacteurs (Новые достижения в регулировке реакторов), *М. В. Попов* | 1—2 | 159 |
| ФИЛОНЕНКО Г. К. и ЛЕБЕДЕВ П. Д., Сушильные установки, *В. Гиа* | 3 | 382 |
| ШОЛЛ ОБЕРИНГ В., Anhaltszahlen über den Elektrizitäts Kraft und Wärmebedarf der Industrie (Показатели потребления электрической энергии, силы и теплоты в промышленности), *М. Бинер* | 3 | 381 |
| В ИНСТИТУТЕ ЭНЕРГЕТИКИ АКАДЕМИИ РНР | 1—2 | 161 |
| В ИНСТИТУТЕ ЭНЕРГЕТИКИ АКАДЕМИИ РНР | 4 | 571 |

ACADÉMIE DE LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE ROUMAINE

INSTITUT D'ÉNERGÉTIQUE

# ÉTUDES ET RECHERCHES D'ÉNERGÉTIQUE

Tome VI 1956

## INDEX ALPHABÉTIQUE


| | n° | page |
|---|---|---|
| APETREI C. et FAUR S., Tâches actuelles de la recherche dans le domaine de l'énergétique | 3 | 183 |
| *ÉNERGÉTIQUE GÉNÉRALE* | | |
| NIȚU V., Expression mathématiques de la sécurité dans l'exploitation des schémas électriques | 3 | 189 |
| PODANI MIRCEA, Méthodes employées pour rédiger le cadastre hydro-énergétique du territoire de la République Populaire Roumaine | 1—2 | 7 |
| *THERMO ÉNERGÉTIQUE* | | |
| GHIA VICTOR V., Contribution à l'évaluation de l'économie de combustible obtenue par l'application, aux fours, de la combustion à recirculation combinée avec le préchauffage de l'air de combustion | 1—2 | 23 |
| PĂNOIU N., Sur la consommation de combustible, lors du fonctionnement au gaz méthane, des fours à clinker fabriqués dans les usines „23 Août" | 4 | 403 |
| PIMSNER VICTOR et VASILESCU ADRIAN CĂLIN, Influence de certains paramètres fonctionnels et constructifs sur le compresseur à jet de gaz naturels | 3 | 207 |
| STAICU C. I., Analyse dimensionnelle. Sur la convection stationnaire dans la circulation forcée turbulente de l'air | 4 | 391 |
| VASILESCU A. C., PIMSNER V. et SVORONOS P., Contribution au développement de la théorie de la politique d'exploitation des gaz naturels en utilisant le compresseur à jet de gaz naturels | 3 | 219 |
| *MACHINES THERMIQUES* | | |
| VASILESCU ADRIAN CĂLIN et PIMSNER V., Contribution à l'étude des moteurs à combustion interne au moyen des chiffres caractéristique | 1—2 | 41 |
| VASILESCU A. C. et PIMSNER V., Influence des dosages pauvres sur la caractéristique de puissance des moteurs à combustible liquide, avec allumage par étincelle, transformés pour fonctionuer aux gaz naturels | 3 | 243 |
| *COMBUSTIBLES SOLIDES* | | |
| BLUM I. et collaborateurs, Etude chimique et technologique des tourbes de la République Populaire Roumaine. Note I. Etude des caractéristiques chimico-techniques et du degré de tourbification | 1—2 | 67 |
| BLUM I., ROSENBERG M. et TACU V., Valorisation du $SO_2$ contenu dans les gaz de combustion des lignites, dans les centrales thermoélectriques | 1—2 | 81 |

| | n° | page |
|---|---|---|
| BLUM I. et collaborateurs, Etude chimique et technologique des tourbes de la République Populaire Roumaine. Note II. Usinage mécanique et processus chimico-technologiques auxquelles sont soumises les tourbes de la la R.P..R. | 3 | 265 |
| BLUM I. L., Eléments caractéristiques dans le processus de cokéfaction de la houille. Note I. Du bitume contenu dans les houilles cokéfiables | 4 | 425 |
| *ÉLECTROÉNERGÉTIQUE* | | |
| ANDRONESCU PLAUTIUS, Le système de mesures en tant que partie intégrante du système de grandeurs | 3 | 281 |
| APETREI C. et ELEFTERESCU M., Modèles électrodynamiques des systèmes électroénergétiques. Modelage des générateurs synchrones | 3 | 311 |
| BUDEANU C., Sur le fonctionnement des soupapes électroniques | 1—2 | 115 |
| DAMSKER DOREL, Automatisations par des machines électriques à réactions positives, calculées par la méthode des fréquences | 4 | 537 |
| DIMO P.. Application de la méthode du consommateur unique à l'étude de la stabilité dynamique des systèmes énergétiques (à l'aide des graphiques de court-circuit) | 4 | 505 |
| FRANSUA AL., Quelques précisions sur l'application par G. Kron du calcul matriciel à l'étude des réseaux électriques complexes | 4 | 461 |
| MANEA F., Conditions-limite de stabilité statiques des systèmes électroénergétiques | 3 | 329 |
| MARINESCU M. et POPOV M., Sur les formes optima de la force électromotrice et de l'inductance dans les machines à inductance variable | 1—2 | 125 |
| MOCANU C. I., Un théorème dans l'étude des réseaux électriques à l'aide du calcul matriciel | 4 | 473 |
| NEDELCU V. N., Expressions des courants qui apparaissent dans les enroulements du stator du générateur synchrone, au moment de sa connexion au réseau. par la méthode de la self-synchronisation | 1—2 | 141 |
| VASILESCU-KARPEN N., Rôle des électrons dans la transmission de l'énergie électrique. Critique de la théorie actuelle | 1—2 | 97 |
| *MOTEURS À COMBUSTION INTERNE* | | |
| GAIGINSKI E., Le domaine de réversibilité des machines thermiques. Les applications de cette notion à l'étude des moteurs à combustion interne | 4 | 441 |
| *NOTES* | | |
| BUIMOVICI D., Au sujet des expériences de combustion des lignites de la R.P.R. dans la R. P. Allemande | 1—2 | 151 |
| CSABA NAGY, Conférence organisée par le conseil central A.S.I.T. et l'Institut d'Energétique de l'Académie de la R.P.R. sur le problème de la consommation spécifique d'énergie | 1—2 | 153 |
| GHIA VICTOR, Au sujet d'une méthode indirecte de détermination del a quantité de combustible brûlée dans le foyer d'une installation quelconque | 4 | 563 |
| MICLESCU T. et MANEA S., Le kilonuméro unité de rapport de la consommation d'énergie électrique dans les filatures de coton | 3 | 347 |
| VASILESCU A. C. et PIMSNER V., Expérimentations réalisées à l'aide d'un compresseur à jet de gaz naturels | 3 | 358 |
| VASILESCU ADRIAN CĂLIN. Au sujet des méthodes objectives de détermination du phénomène de détonation pour les moteurs d'autocamion en série | 4 | 559 |
| UNGUREANU ONOFREI, Au sujet de certains résultats obtenus lors du chauffage du gaz méthane | 4 | 567 |
| *EXPOSÉS* | | |
| BÎLA C., La réactance inverse de la machine synchrone triphasée | 3 | 370 |
| FRANSUA ALEXANDRU, Etude d'une machine électrique à courant continu, à caractéristique en série, sans enroulement d'excitation, utilisant le flux de réaction de l'induit | 3 | 363 |

| | n° | page |
|---|---|---|
| *COMPTES RENDUS* | | |
| BĂRĂNESCU GEORGE, *Calculul proceselor de ardere* (Calcul des processus de combustion), par Adrian Călin Vasilescu etc Victor Pimsner . . . . . | 1—2 | 156 |
| BOULGAKOV A. A., *Tchiastotnoe oupravlénié asinkronnyk elektrodvigatéléi* (Réglage de la vitesse des moteurs synchrones par variation de la fréquence de la source d'alimentation), par V. N. Nedelcu . . . . . | 1—2 | 158 |
| FILONENKO G. K. et LÉBÉDÉV P. D., Installations de séchage, par V. Ghia | 3 | 382 |
| POPESCU PASCAL, PIMSNER VICTOR et VASILESCU A. C., (Contribution à l'étude et à la fabrication des combustibles pour turbomoteurs d'avion), par Marcel Biener . . . . . | 3 | 384 |
| MOSTKOV M. A., *V vedenie v sistemmouillou hidroénerguétiki* (Introduction à l'hydroénergétique des systèmes énergétiques) par Mircea Podani . . . | 1—2 | 155 |
| SCHOLL OBERING W., *Anhaltszahlen über den Elektrizitäts — Kraft und Wärmebedarf der Industrie* (Indices de consommation d'énergie électrique — force — et chaleur de l'industrie), par Marcel Biener . . . . . | 3 | 381 |
| TÉBENKOV B. P., Récupérateurs pour fours industriels, par Victor V. Ghia. | 4 | 569 |
| WEILL JACK, Progrès récents dans le contrôle des réacteurs, par M. V. Popov | 1—2 | 159 |
| I.D.T., (Nouvelles méthodes d'appréciation et de mise en valeur des tourbes, par Gheorghiță C. Ionescu . . . . . | 3 | 348 |
| L'ACTIVITÉ DE L'INSTITUT D'ÉNERGÉTIQUE DE L'ACADÉMIE DE LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE ROUMAINE . . . . . | 1—2 | 161 |
| L'ACTIVITÉ DE L'INSTITUT D'ÉNERGÉTIQUE DE L'ACADÉMIE DE LA RÉPUBLIQUE POPULAIRE ROUMAINE . . . . . | 4 | 571 |

ABONAMENTELE SE FAC LA OFICIILE POŞTALE,
PRIN FACTORII POŞTALI ŞI DIFUZORII VOLUNTARI
DIN ÎNTREPRINDERI ŞI INSTITUŢII